Ing. FRANCISCO L. SINGER

TRATADO DE BOBINADOS

H.A.S.A.

Ing. FRANCISCO L. SINGER

TRATADO DE BOBINADOS

TRATADO DE BOBINADOS

FRANCISCO L. SINGER
INGENIERO MECÁNICO Y ELECTRICISTA

TRATADO DE BOBINADOS

TERCERA EDICION

EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A.
ALSINA 731 BUENOS AIRES

Primera edición: Diciembre 1958
Segunda edición: Agosto 1963
Tercera edición: Julio 1969

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723
Copyright © by Editorial Hispano Americana S. A.
Alsina 731, Buenos Aires, 1969

Impreso en Argentina *Printed in Argentina*

PROLOGO

No es fácil concebir actividad humana en la que no intervengan las máquinas eléctricas, pues aparecen en la industria, en los transportes, en las comunicaciones y en el hogar. Su buen rendimiento, la facilidad de manejo, la invulnerabilidad a fallas frecuentes y otras ventajas han hecho que desplacen poco a poco a otros tipos de motores en la utilización común de la energía. Pero frente a ese panorama se presenta la dificultad que encarna el desconocimiento de la forma de repararlas cuando se produce el desperfecto. El retiro de servicio de una máquina es debido, en la mayoría de los casos, a fallas en los bobinados, ya sean del inductor o del inducido, por deterioros de aislación o por haber sido sometida a un trabajo para el que no estaba prevista.

Entra ahora en funciones el bobinador, que consultará, previa verificación del tipo de máquina, sobre la forma de hacer la reparación. Necesita un tratado de bobinados, cuanto más práctico mejor, aunque no tenga complicados desarrollos matemáticos pero en el que no falten los ejemplos demostrativos. Éste es el objeto de la presente obra, que primero describe el funcionamiento de las máquinas eléctricas con ayuda de unos cuantos principios de Electrotecnia que también enumera, luego desarrolla en forma general los principios de ejecución de los bobinados y termina con dar ejemplos de cálculo de rebobinajes, de transformación de máquinas de un tipo en otros y describe los principios generales de la revisión de fallas y sus remedios.

Para limitar la extensión del volumen se ha resumido la parte que abarca las nociones de Electroteenia a un mínimo que podrá parecer insuficiente, pero que se utiliza como base para el desarrollo de los temas restantes. Y es que no se puede ser bobinador sin ser electricista y la conclusión mencionada obliga al repaso de principios tal vez conocidos pero que se necesitan recordar con precisión para compenetrarse mejor de lo que sigue.

Los lectores que hayan leído los tres tomos del Manual del Bobinador que precedieron a este libro podrán apreciar en qué forma se ha completado la obra y cuántos temas se han agregado, pues no ha sido improductiva la experiencia acumulada desde entonces, cuyos frutos quedan condensados en las páginas que siguen.

EL AUTOR

PARTE PRIMERA

NOCIONES DE ELECTROTECNIA

NOCIONES DE ELECTRICIDAD ELECTROMAGNETISMO

NOTA: *Se advierte al lector que esta primera parte tiene el carácter de una revisión de las leyes de la Electricidad, necesarias para las explicaciones posteriores. El estudio más completo debe buscarse en algún tratado sobre la materia.*

CAPITULO 1

NOCIONES SOBRE ELECTRICIDAD

Si se desmenuza un cuerpo sólido hasta llegar a un fino polvillo, todavía no se llega a la mínima subdivisión del cuerpo. La más pequeña porción de la materia se llama átomo, y las teorías modernas han demostrado que los átomos están constituídos por un pequeñísimo sistema planetario con un astro central y planetas girando en su entorno. Los líquidos y los gases también tienen la misma composición, sólo que los átomos no están rígidamente unidos entre sí como en los sólidos.

Los corpúsculos exteriores que giran se llaman *electrones* y los del núcleo son los *protones* y los *neutrones*. Los electrones giran con velocidades del orden de 100 mil kilómetros por segundo, y no son despedidos violentamente debido a la atracción que sufren por parte de los protones. Los neutrones, en cambio, no ejercen atracción ninguna sobre los otros corpúsculos. Para que el átomo sea estable debe haber igual cantidad de protones que electrones, ya que entre ellos se mantienen atraídos.

A los efectos que se producen debido a las atracciones o repulsiones entre los corpúsculos, y en general, a ellos mismos, se llama *electricidad*. Como el electrón o el protón son los granos mínimos obtenibles, se dice de ellos que son la más pequeña cantidad de electricidad. Y se atribuye distinto nombre o signo a esas dos clases de electricidad: a la de los electrones se llama *negativa* y a la de los protones, *positiva*. Luego, cuando en un átomo hay igual cantidad de las dos clases de corpúsculos eléctricos, queda neutralizado, y no se nota ningún efecto exterior. Como la electricidad se llama también *carga eléctrica*, se dice en ese caso que el átomo está desprovisto de carga.

Ahora bien, dijimos que los protones y los electrones se atraen entre sí; pero los de igual nombre o signo se rechazan, es decir que dos electrones se repelerán, y lo mismo harán dos protones. Esto se expresa diciendo que cargas eléctricas de igual signo se repelen y cargas de distinto signo se atraen.

Electrización de la materia

En cada átomo de un cuerpo hay igual cantidad de protones y electrones, y eso sucede en el hidrógeno que tiene uno de cada clase hasta el uranio, que tiene 92, encontrándose comprendidos entre ellos los otros cuerpos simples conocidos, con cantidades de corpúsculos que van desde 1 hasta 92. Pero si por cualquier medio sacamos o agregamos electrones a un átomo, se pierde el equilibrio entre la electricidad positiva y negativa, y ese átomo queda con un exceso de una de las dos. En tal caso se dice que está *electrizado.*

Si se quitan electrones, quedará un exceso de protones, y se manifestará carga eléctrica positiva; si se agregan electrones el exceso de ellos revelará carga negativa. Y lo que sucede en un átomo de un cuerpo puede pasar en muchos, digamos en un cuerpo entero, quedando así electrizado todo el cuerpo.

El primero en observar tal cosa fué Thales, unos 400 años antes de nuestra era, en Mileto, Grecia. Sus experiencias las hizo con ámbar, que se llama elektron en su idioma, de cuya circunstancia derivó el nombre actual de la electricidad. La Fig. 1 muestra esquemáticamente las dos clases de experiencias. Frotando una barra de vidrio en un paño, la barra pierde electrones y queda cargada positivamente; frotando en cambio una barra de resina, se observa que quita electrones al paño, y se carga negativamente. La diferencia se debe a la mayor aptitud electrónica de la resina con respecto al vidrio.

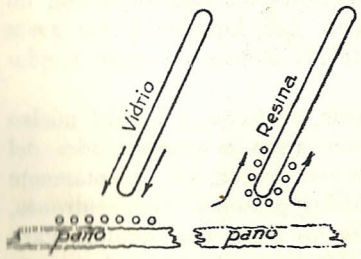

Fig. 1. — Formación de cargas eléctricas por frotamiento.

El desconocimiento de la teoría atómica en aquel entonces hizo llamar electricidad vítrea a la positiva y resinosa a la negativa. Y se notó que se producía el fenómeno porque la barra frotada era capaz de atraer pequeños trocitos de papel u otros materiales muy livianos. Hoy se sabe que el frotamiento produce electrización en todos los cuerpos, en mayor o menor grado, pero hay cuerpos que mantienen la carga eléctrica en el extremo como para hacer comprobaciones y otros no la mantienen, pues la carga se corre por ellos disipándose o yéndose a través del cuerpo que está sosteniendo la barra.

El distinto comportamiento de los cuerpos al recibir una carga eléctrica ha permitido clasificarlos en dos tipos distintos: los que son capaces de mantener una carga en el lugar en que ella se produce y los que la disipan rápidamente; los primeros se llaman malos conductores o aisladores y los segundos buenos conductores. En realidad no hay ningún cuerpo que sea aislador o conductor perfecto, pero en general los metales y los ácidos son buenos conductores, siendo el mejor el cobre, luego la plata, el aluminio, etcétera. Los aisladores son el vidrio, la porcelana, la goma, la mica, etcétera.

Es evidente que esa propiedad tiene una importancia extraordinaria, pues

si se quiere llevar una carga eléctrica de un lugar a otro se colocará un cuerpo conductor; esta es la razón por la cual se emplean cables y alambres de cobre para conducir electricidad. Si se quiere que una carga eléctrica no circule o no se escape de un lugar, se colocará en ese lugar un cuerpo aislador, como la goma o la porcelana; esta es la razón por la cual los cables se envuelven en goma y se sujetan con trozos de porcelana que se denominan aisladores.

Campo eléctrico

Si se coloca un cuerpo electrizado aislado en el espacio, por ejemplo, colgado en el centro de un salón, su influencia se notará en todos los lugares vecinos. A la zona afectada se la denomina campo eléctrico, y se reconoce esa influencia porque si se colocan electrones o cargas eléctricas pequeñas en las cercanías, serán atraídas o rechazadas por el cuerpo central, según el signo de la carga. La figura 2 muestra el cuerpo electrizado y dos pequeñas cargas colocadas en A y B que son atraídas porque tienen signo negativo, mientras que el cuerpo está cargado positivamente.

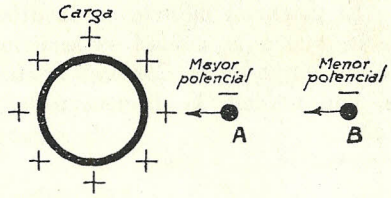

Fig. 2. — Acción del campo eléctrico sobre las cargas

Es evidente que acercándonos a la carga Q el efecto será más notable, o lo que es lo mismo las fuerzas de atracción serán mayores, y alejándonos esas fuerzas se reducirán. Para poder medir los efectos hay que adoptar una unidad de carga eléctrica o de cantidad de electricidad. Prácticamente el electrón resulta muy pequeño para servir de unidad, así como el milímetro no se emplearía para medir extensiones de tierra. Se ha convenido en fijar como unidad de carga una cifra de 6,29 trillones de electrones y a esa cantidad se la llama *Coulomb.*

Potencial eléctrico

El trabajo tiene un significado popular y uno técnico; puede establecerse una similitud entre ellos si imaginamos el transporte de un peso en un recorrido. A mayor peso mayor trabajo y a mayor recorrido también. En la técnica se determina el trabajo multiplicando el peso o la fuerza por el recorrido efectuado. En el campo eléctrico hay fuerzas actuantes que atraen o repelen las cargas eléctricas, con lo que las obligan a hacer recorridos; luego se puede hablar de trabajo realizado o a realizarse. El que está por realizarse se dice que está en potencia o que es potencial.

Para aplicar estos conceptos al campo eléctrico de la figura 2, diremos que se hace la siguiente convención. Si se coloca una carga unidad, o sea un Coulomb en el punto A, será atraída por la carga Q, y si la empujamos

hasta sacarla de la influencia de Q se habrá tenido que hacer un trabajo porque durante todo el recorrido existía una fuerza que tiraba desde Q. El trabajo que costó sacar un Coulomb de electricidad desde A hasta fuera de los efectos de Q se denomina el *potencial del punto A*. Y si imaginamos ahora colocarnos con una carga de un Coulomb en el punto B y hacemos lo mismo, sacándolo lejos hasta que no haya campo eléctrico, también se gastará un trabajo, que llamaremos *potencial del punto B*.

Es evidente que el potencial del punto A será mayor que el del B, por estar el primero más sujeto a los efectos de la carga central Q. Luego si hay en A y B cifras distintas de potencial se pueden restarlas entre sí y hallar lo que se llama *diferencia de potencial* entre los puntos A y B, que tiene una importancia extraordinaria en la Electrotecnia. En efecto, si colocamos un alambre conductor entre los puntos A y B, una carga eléctrica colocada en un extremo de ese alambre será llevada al otro extremo por las fuerzas eléctricas, obteniéndose un movimiento de cargas que, veremos más adelante, se llama corriente eléctrica.

El potencial eléctrico o la diferencia de potencial se miden en Volt, es decir, que a la unidad se la llamó Volt. Esto indica que si el transporte de una carga de un Coulomb desde un punto hasta otro desarrolla un trabajo de una unidad, la diferencia de potencial entre esos dos puntos vale un Volt.

Capacidad eléctrica

En todas las zonas vecinas de un cuerpo se ponen de manifiesto las fuerzas eléctricas, capaces de atraer o rechazar a las pequeñas cargas que acerquemos, según su signo. Supongamos que acercamos un cuerpo neutro, o sea no electrizado, a un cuerpo cargado de electricidad, como se ve en la figura 3. El cuerpo cargado se llama inductor, y si su carga es fuerte, al acercar el otro le va a hacer sentir su influencia arrancando electrones de los átomos superficiales y atrayéndolos. Es decir, que el segundo cuerpo que llamamos inducido quedará electrizado por mitades, pues en la zona más cercana al inductor aparecerán cargas de sentido contrario a las de éste por la atracción ejercida sobre ellas; y las cargas del mismo signo que las del inductor serán repelidas hacia las zonas más alejadas. Se puede distinguir una franja de separación entre las dos zonas cargadas, que se llama zona neutra.

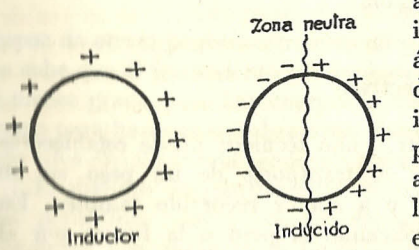

Fig. 3. — Electrización por influencia.

Al fenómeno descrito se lo llama electrización por influencia o inducción eléctrica, y es tanto más notable cuanto mayor sea la carga del cuerpo inductor y cuanto más cerca se coloque al cuerpo inducido. El tamaño del

cuerpo también tiene importancia, puesto que siendo más grande habrá mayor cantidad de átomos en los cuales se puede destruir el equilibrio eléctrico interno, desprendiendo electrones.

Si en los dos cuerpos citados en la figura 3 se desea mantener la carga eléctrica, bastaría tocar con un alambre unido a tierra la parte positiva del cuerpo inducido, con lo cual se escaparían las cargas de ese signo. Queda así un cuerpo cargado positivamente y el otro negativamente.

Pero lo mismo se puede conseguir si se unen los dos cuerpos a puntos que estén a distinto potencial en el campo eléctrico, es decir que entre ellos haya una diferencia de potencial. Se comprueba que en esos cuerpos se acumula una carga eléctrica superficial de distinto signo en ambos. Esa carga superficial recuerda la condensación de la humedad del aire sobre los vidrios de las ventanas, por cuya similitud se llama condensación y al par de cuerpos se le da el nombre de *condensador* o *capacitor*. La propiedad de acumular cargas eléctricas se llama *capacidad* o *capacitancia*.

Para conseguir mejores resultados se construyen los dos cuerpos en forma de placas, colocándolas paralelas y muy próximas, como se ve en la figura 4. Las placas se llaman *armaduras del capacitor*, y se conectan mediante alambres conductores a los dos puntos entre los cuales hay una diferencia de potencial.

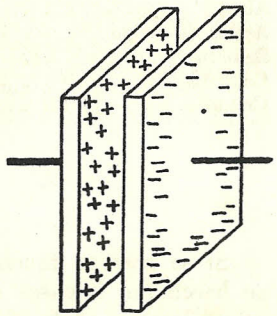

Fig. 4. — Formación de cargas eléctricas en un capacitor.

Se define como la medida de la capacidad de un capacitor a la cantidad de electricidad que puede acumular bajo la diferencia de potencial de un Volt. Es decir, que si unimos las placas a dos puntos del campo eléctrico entre los cuales hay una diferencia de potencial de un Volt, y se produce en el capacitor una carga o cantidad de electricidad de 5 Coulomb, diremos que ese capacitor tiene una capacidad de 5 Farad, ya que éste es el nombre de la unidad de capacidad. Y si en vez de 5 Coulomb, se tienen más o menos, esa cifra mide la capacidad. Pero si la diferencia de potencial entre las placas es mayor de un Volt, la acumulación será lógicamente mayor, y para determinar la capacidad hay que dividir la carga eléctrica por esa diferencia de potencial, para cumplir con la definición, es decir, que se puede calcular la capacidad con la fórmula:

$$C = \frac{Q}{E}$$

Donde Q es la cantidad de electricidad acumulada en Coulomb, E es la diferencia de potencial entre placas, en Volt y C es la capacidad del capacitor en Farad. En la práctica el Farad resulta muy grande y suele usarse la millonésima parte, o sea el microfarad.

Constante dieléctrica

Si se coloca entre las placas de un capacitor una lámina de mica, se observa que la capacidad es mayor, pues aumenta unas 6 veces; si colocamos un trozo de papel parafinado la capacidad aumenta unas 3,7 veces. Y así se encuentran substancias llamadas *dieléctricos* que aumentan la capacidad de los condensadores. Al número de veces que le aumentan la capacidad se le llama constante dieléctrica de esa substancia. En el capacitor de la figura 4 el dieléctrico es el aire mismo, y se lo toma como referencia, o sea que la constante dieléctrica del aire vale la unidad.

Valores de la constante dieléctrica

Substancia	Constante dieléctrica	Substancia	Constante dieléctrica
Aire	1,0	Ebonita	2,8
Aceite de ricino	4,6	Mica	6,0
Bakelita	5,0	Papel	1,5
Celuloide	4,1	Papel parafinado	3,7
Cristal	6,0	Porcelana	6,0

Rigidez dieléctrica

Si se acercan mucho las dos placas del capacitor, las fuerzas eléctricas se hacen tan intensas que las cargas saltan bruscamente de una placa a la otra, descargándolo. Si hay una lámina de dieléctrico sólido la chispa de descarga la perfora, inutilizándola. Para evitar esa contingencia los fabricantes de capacitores indican en los mismos la máxima diferencia de potencial que puede conectarse entre placas sin peligro, pues las fuerzas eléctricas dependen directamente de esa diferencia.

De manera que en un capacitor de aire, de mica, de papel, etcétera, hay dos cifras indicadas en su placa de fábrica; la capacidad y la máxima diferencia de potencial a conectar, que también se llama *tensión eléctrica* o simplemente *tensión*. Así por ejemplo, se leerá: Capacidad 25 microfarad; tensión máxima 220 Volt.

Corriente eléctrica

Hemos dicho que los electrones constituían cargas eléctricas elementales, y que si se acumulaba una cierta cantidad de cargas, se podía producir un desplazamiento de las mismas. Ese desplazamiento rapidísimo de electrones se llama corriente eléctrica. Sabemos también que para que se produzca un movimiento de cargas, debe haber una diferencia de potencial entre dos puntos y precisamente entre los que habrá desplazamiento.

Sean entonces dos puntos de un campo eléctrico entre los cuales hay una cierta diferencia de potencial. Si los unimos con un material conductor, habrá circulación de electrones hasta que se nivele esa diferencia de potencial. La circulación se hace con velocidad fabulosa, cerca de 300.000 kilómetros por segundo. Pero para saber cuántos electrones han pasado de un extremo al otro, no basta ese dato.

Si nos referimos al tránsito de vehículos, por ejemplo, hablamos de la densidad de ese tránsito mencionado, esto es, la cantidad que pasa en una unidad de tiempo por un lugar determinado, pues decir que han pasado 1.000 vehículos no es suficientemente explícito. En cambio, si decimos que pasan 1.000 por hora, significamos que el tránsito es intenso. Por la misma razón, la cantidad de electricidad o carga eléctrica que pasa por un conductor desde un punto hasta el otro no nos indica si esa circulación es intensa. Pero si determinamos la cantidad de electricidad que pasa en la unidad de tiempo, es decir, la cantidad de Coulomb (unidad de cantidad de electricidad) que pasa por el cable en un segundo (unidad de tiempo adoptada), esa cifra es bien clara y da idea de cómo pasa esa corriente eléctrica.

A la cantidad de electricidad que pasa por segundo por un conductor se la llama *intensidad de corriente eléctrica*. La unidad de intensidad, es decir, la intensidad que resulta cuando pasa un Coulomb por segundo se llama *Amper*. Si en t segundos han pasado Q Coulomb, la intensidad se puede calcular por el cociente:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Como es evidente, resulta I en Amper.

Ley de Ohm

Si se dispone de dos puntos entre los cuales hay una diferencia de potencia, circulará una corriente eléctrica de cierta intensidad. Es evidente que esa intensidad depende de la mayor o menor facilidad que ofrezca el conductor a la circulación, y de la mayor o menor diferencia de potencial que hay entre los extremos del cable conectado.

Ohm postuló la ley que lleva su nombre y que permite establecer la relación existente entre esas tres magnitudes, sólo que en lugar de referirse a la facilidad que ofrece el conductor, lo hace a la dificultad que opone el cuerpo a la circulación, dificultad que se llama *resistencia eléctrica*. Resulta así que la intensidad de corriente circulante será directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia. Es decir que se puede escribir; de acuerdo con la figura 5:

$$I = \frac{E}{R}$$

Donde hemos llamado E a la diferencia de potencial en Volt que hay

entre los dos puntos en que se coloca el conductor que ofrece una resistencia R al paso de la corriente. Esta resistencia se mide en Ohm, y la intensidad se mide en Amper. Observando la fórmula se ve que, cuanto mayor sea E más intensa será la corriente, y que, por el contrario, cuanto mayor sea la resistencia ofrecida por el conductor menor será la intensidad. Hablando de las unidades, resulta que cuando la diferencia de potencial entre extremos del conductor vale un Volt, y circula una corriente de un Amper, es porque la resistencia del cable vale un Ohm.

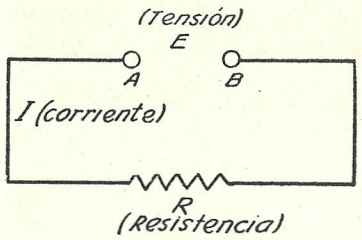

FIG. 5. — En un circuito cerrado que parte de un punto A y llega a un punto B entre los cuales hay una diferencia de potencial E, si tiene una resistencia R circula una corriente I.

La ley de Ohm puede ser escrita de otras dos maneras, con auxilio de la Matemática, es decir que se puede calcular la diferencia de potencial cuando se conoce la intensidad y la resistencia:

$$E = IR$$

O se puede calcular la resistencia cuando se conoce la diferencia de potencial y la intensidad de la corriente:

$$R = \frac{E}{I}$$

Unidades internacionales

Para evitar discrepancias en lo que se refiere a la fijación de los valores unitarios que intervienen en la Ley de Ohm, una convención internacional fijó dos de esas magnitudes: el Amper y el Ohm. Con ellas la tercera resulta automáticamente fijada con la segunda forma de la Ley.

Se dice que una corriente tiene una intensidad de un Amper Internacional, cuando al pasar por una solución de nitrato de plata deposita una cantidad de plata de 1,118 miligramos por segundo.

Se da el nombre de Ohm Internacional a la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica una columna de mercurio de 106,3 centímetros de largo, con una masa de 14,452 gramos (corresponde a una sección transversal de un milímetro cuadrado aproximadamente), a la temperatura de 0° C y presión normal.

Luego, entre los extremos de un conductor de un Ohm Internacional de resistencia, si circula una intensidad de un Amper Internacional, es porque la diferencia de potencial aplicada vale un Volt Internacional. Hacemos notar que es usual designar a la diferencia de potencial con el nombre de *tensión*.

Resistencia eléctrica

Al mencionar las propiedades de la materia para conducir los electrones, es decir la corriente eléctrica, dijimos que había cuerpos buenos y malos conductores, pero no eran perfectos en uno u otro sentido. Los hay mejores conductores pero no conductores absolutos. La razón de la diferente facilidad o dificultad que oponen al paso de la corriente, debe buscarse en la diferente constitución atómica. Hemos visto ya la influencia decisiva que tiene la dificultad o resistencia eléctrica en la circulación de la corriente. Veamos ahora cómo se puede calcular el valor de la resistencia según las dimensiones de los cuerpos y la materia de que están hechos.

Los cuerpos que se emplean para conducir corriente eléctrica se llaman en general conductores, y en particular cables o alambres por su aspecto físico. De esto resulta que casi siempre su forma será la de un cilindro o prisma de gran longitud y pequeña sección transversal. Para poder comparar entre sí a los distintos materiales se ha medido prolijamente la resistencia eléctrica de trozos iguales de diferentes substancias, llegándose a la conclusión que el mejor conductor es el cobre puro, luego la plata, y así siguiendo. Los trozos elegidos tenían un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección transversal, es decir, pedazos de alambre largos y delgados, como se ve en la figura 6. A la resistencia de ese trozo se ha convenido en llamarla *resistencia específica* o *resistividad* y se da en Ohm. La tabla resume los datos para los más comunes:

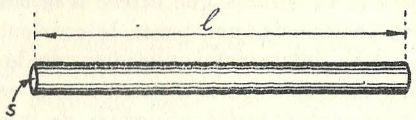

FIG. 6. — Indicación de las dimensiones de un conductor.

Substancia	Resistividad
Cobre	0,0175
Plata	0,016
Aluminio	0,026
Acero	0,1
Estaño	0,12
Plomo	0,21
Mercurio	0,95
Platino	0,094
Zinc	0,06
Constantán	0,50
Nicrom	1,1
Manganina	0,42
Niquelina	0,44
Maillechort	0,30

Debe hacerse notar que la plata aparece como de menor resistencia espe-

cífica que el cobre, por figurar en la tabla el cobre comercial, que no es perfectamente puro.

Conociendo la resistencia que tiene un trozo de un metro de largo y un milímetro cuadrado de sección transversal, resulta fácil ahora calcular la resistencia de cualquier tamaño de conductor. Supongamos que la longitud sea *l* en metros y la sección transversal *s* en milímetros cuadrados. La resistividad se designa por la letra griega ϱ. La resistencia eléctrica será igual a la resistividad multiplicada por la longitud, ya que ϱ se toma para un metro, y dividida por la sección transversal, pues ϱ vale para un milímetro cuadrado; luego se tiene:

$$R = \frac{\varrho\, l}{s}$$

Lo que es evidente, puesto que cuanto más largo sea el conductor, mayor será la resistencia que ofrece a la corriente, y cuanto más grueso, menor será esa resistencia, por pasar la corriente con más facilidad.

Una interesante aplicación de lo dicho es calcular la cantidad de alambre necesario para construir una resistencia determinada, por ejemplo. De la fórmula anterior se deduce de inmediato que la longitud vale:

$$l = \frac{R\, s}{\varrho}$$

De modo que si se desea tener una resistencia R en Ohm, con un alambre de resistividad ϱ, dada en la tabla, con sección transversal *s* en milímetros cuadrados, se empleará la longitud en metros que resulta del cálculo.

Trabajo eléctrico

Cuando definimos el potencial eléctrico dijimos que se llamaba así al trabajo necesario para transportar una carga unitaria, o sea de un Coulomb, bajo las fuerzas eléctricas. Si en lugar de transportar una carga o cantidad de electricidad de un Coulomb, transportamos una mayor, de Q Coulomb, el trabajo será precisamente Q veces mayor, o sea igual al potencial multiplicado por Q. Como en el transporte de cargas eléctricas se establece que éste se realiza entre dos puntos que están a distinto potencial, tomaremos la diferencia de potencial o tensión E, y calculamos el trabajo con la fórmula:

$$T = E\, Q$$

Trabajo que se mide en Joule, cuando E se da en Volt y Q en Coulomb. Pero hemos afirmado que es preferible conocer la intensidad de corriente eléctrica y no la total circulante, y sabemos que la intensidad se calcula

dividiendo la carga por el tiempo, luego la carga será igual a la intensidad multiplicada por el tiempo en segundos, es decir:

$$Q = I\, t$$

que reemplazada en la fórmula del trabajo resulta:

$$T = E\, I\, t$$

Es decir que el trabajo eléctrico en Joule es igual al producto de la tensión en Volt, por la intensidad en Amper, por el tiempo en segundos. Este trabajo eléctrico se pone en juego por la circulación de cargas eléctricas, y se puede aprovechar en forma de calor, luz, movimiento, etcétera, según procedimientos que veremos más adelante.

Potencia eléctrica

En Física se define la potencia como el trabajo realizado o a realizarse en la unidad de tiempo. Es decir que la potencia da idea de la capacidad para producir trabajo de una máquina o fenómeno físico, pues cuanto más trabajo se haga en un segundo, más potente será el agente encargado de hacerlo. De modo que para determinar la potencia eléctrica no habrá más que dividir el trabajo por el tiempo, para cumplir con el concepto emitido.

La fórmula del trabajo escrita más arriba tiene un factor *t* que es el tiempo tomado en segundos, de modo que al dividir por el tiempo se podrá simplificar la expresión anulando ese factor:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{E\, I\, t}{t} = E\, I$$

De modo que la potencia resulta dada por el producto de la tensión en Volt, por la intensidad en Amper. Se acostumbra a emplear para la potencia eléctrica la letra W, inicial del nombre de la unidad, que es el Watt:

$$W = E\, I$$

De esto resulta que si en un conductor se ha aplicado una diferencia de potencial de E Volt, y circula una intensidad de I Amper, se desarrolla una potencia W Watt; pero puede ser que no se conozca la tensión o la intensidad, las que pueden calcularse en base a la ley de Ohm. Si se reemplazan sucesivamente la E y la I por sus equivalentes se tienen dos expresiones diferentes de la potencia:

$$W = I^2\, R$$

Donde la potencia es igual al cuadrado de la intensidad por la resistencia, y:

$$W = \frac{E^2}{R}$$

Que dice que la potencia es igual al cuadrado de la tensión dividido por la resistencia.

En los artefactos eléctricos de uso doméstico se pueden leer cifras de potencia marcadas por la fábrica respectiva. Conocida la potencia y algún dato se pueden determinar las restantes magnitudes.

Unidades prácticas de potencia y de trabajo

La potencia en Mecánica suele expresarse en kilográmetros por segundo, ya que el trabajo se obtiene por el producto de la fuerza en kilogramos por la distancia en metros, y como la potencia es el trabajo realizado en un segundo, hay que dividirlo por el tiempo tomado en segundos. Pero en los usos prácticos se emplea frecuentemente una unidad más grande que vale 75 kilográmetros por segundo, que se llama Caballo Vapor (C.V. o también H.P., aunque hay una ligera diferencia entre éstas). Resulta interesante determinar la equivalencia por que los motores eléctricos realizan trabajos mecánicos y los motores mecánicos accionan generadores eléctricos.

Se puede calcular fácilmente que la unidad mecánica práctica de potencia vale:

$$1 \text{ C.V.} = 736 \text{ Watt (W)}$$

O lo que es lo mismo, si se emplea una unidad 1.000 veces mayor que el Watt, llamada Kilowatt, resulta:

$$1 \text{ C.V.} = 0{,}736 \text{ Kilowatt (Kw)}$$

Con lo que puede hacerse la reducción cada vez que sea necesario. De la misma manera se obtendría que:

$$1 \text{ Kw} = 1{,}36 \text{ C.V.}$$

En los cálculos prácticos del consumo de energía eléctrica, que emplean los usuarios y que factura la empresa distribuidora, no se emplea el Joule como unidad de energía, por resultar muy pequeña. Se usa el Kilowatt-hora, que resulta mucho mayor, ya que el Kilowatt vale mil Watt y la hora tiene 3.600 segundos. Es decir que:

$$1 \text{ Kilowatt-hora (KWh)} = 3.600.000 \text{ Joule}$$

Para determinar rápidamente el consumo de energía de un artefacto que tiene una potencia de W (Watt) que estuvo conectado durante h horas, se puede emplear la fórmula directa:

$$\text{KWh} = \frac{\text{W h}}{1.000}$$

Resultando directamente el trabajo o energía eléctrica en Kilowatt-horas, cifra que multiplicada por la tarifa da el costo de energía consumida.

Transformación de la electricidad en calor

El paso de la corriente eléctrica por los conductores da origen a un aumento de la agitación electrónica interna, lo que se traduce en una elevación de temperatura del conductor. Esto se aprovecha para fines prácticos haciendo que la cantidad de calor producido sea grande. Los calentadores, planchas, cocinas, etc., son otras tantas aplicaciones prácticas del calor eléctrico.

Si se tiene un alambre conductor de cierta resistencia eléctrica, recorrido por una corriente durante un cierto tiempo, la cantidad de calor que se produce es directamente proporcional a la energía eléctrica puesta en juego. Ahora bien la unidad de energía térmica o calorífica, es decir, la cantidad de calor se mide en calorías, unidad que se define así: una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua. Hay que hacer notar que se emplea la gramo-caloría y la Kilo-caloría, refiriéndose a un gramo o a un Kilogramo de agua, respectivamente. La dualidad se evita escribiendo caloría y Kilocaloría.

La equivalencia entre la energía eléctrica y térmica se determina mediante la *ley de Joule*, que dice que cada unidad de trabajo eléctrico produce 0,24 calorías, es decir que si expresamos el trabajo eléctrico por el producto de la potencia y el tiempo, podemos poner:

$$Q = 0{,}24 \text{ W t}$$

Que dice que la cantidad de calorías producidas se obtiene multiplicando el coeficiente numérico 0,24 por la potencia en Watt y por el tiempo en segundos. Y es evidente que la potencia puede calcularse mediante cualquiera de sus tres expresiones ya vistas o reemplazarla directamente en la fórmula de Q.

Para construir calentadores eléctricos se tratará que el alambre de que están hechos tenga mucha resistencia y que la corriente que lo recorre sea de mucha intensidad, dentro de las limitaciones prácticas. Si se usan alambres muy finos, la temperatura de los mismos se eleva notablemente, alcanzándose el estado de incandescencia con vivo resplandor; son las lámparas eléctricas usuales.

Variación de la resistencia con la temperatura

Los conductores se comportan diferentemente al paso de la corriente si están fríos o calientes. En general la resistencia eléctrica de los mismos se eleva al calentarlos, o sea aumenta la dificultad que oponen a la circulación de cargas eléctricas. Solamente el carbón entre los cuerpos comunes presenta una característica inversa de la mencionada, reduciendo su resistencia al calentarse.

Se ha comprobado que el aumento de resistencia de los conductores es proporcional a la elevación de temperatura, y desde luego, al valor de la resistencia, puesto que si se produce un aumento de 10 % por ejemplo, en 10 Ohm ese aumento es de 1 Ohm, pero en 100 Ohm, vale 10 Ohm. Hay tablas que dan el aumento de resistencia que experimentan los diferentes conductores

por Ohm y por grado centígrado de elevación de temperatura. La tabla siguiente da los valores más comunes del llamado *coeficiente de temperatura*, designado comúnmente con la letra griega alfa (α), y que es el aumento de resistencia por Ohm y por grado:

Substancia	α
Cobre	0,004
Plata	0,0036
Aluminio	0,0037
Acero	0,005
Estaño	0,0045
Plomo	0,0037
Mercurio	0,00087
Platino	0,0024
Zinc	0,0039
Constantán	0,00003
Nicrom	0,00014
Manganina	0,00001
Niquelina	0,0003
Maillechort	0,0004
Tungsteno	0,0045

Se notará en la tabla que hay aleaciones como la manganina y el constantán que tienen un coeficiente de temperatura muy reducido. Ello se debe a que esas aleaciones se han buscado por esa característica, para construir resistencias inalterables con el calor, o por lo menos, poco variables.

Para determinar el valor de una resistencia eléctrica a una temperatura distinta de la de referencia, que es comúnmente 20°C, hay que calcular cuánto es la alteración por el calor. Hemos dicho que alfa es el aumento por Ohm y por grado; el aumento total experimentado en el valor de la resistencia vale:

$$\alpha \, R_i \, t$$

Siendo R_i la resistencia en frío o inicial, α el valor de la tabla y t la variación o aumento de temperatura experimentado. Como en frío tenemos un valor R_i de resistencia, en caliente tendremos ese mismo más el aumento, o sea:

$$R_f = R_i + \alpha \, R_i \, t$$

O simplificando la expresión con ayuda del álgebra:

$$R_f = R_i \, (1 + \alpha t)$$

Donde R_f es la resistencia final o en caliente, y los demás datos son conocidos.

CAPITULO II

ELECTROMAGNETISMO

Hace mucho tiempo que se descubrió accidentalmente la propiedad que tenían ciertas piedras de atraer partículas metálicas. Las piedras se llamaron *imanes* y la propiedad, *magnetismo*. Acercando un imán a un montón de limaduras de hierro, por ejemplo, se observaba que quedaban adheridas en sus extremos. Era evidente que en el entorno del imán había fuerzas, las que actuaban sobre las partículas de hierro. Probando con otros materiales, no sucedía lo mismo, salvo contados casos. De manera, pues, que el magnetismo se manifiesta en el hierro, acero y sus derivados, y raramente en otros cuerpos.

Frotando una barra de hierro con una piedra imán, se observó que la barra quedaba imanada, adquiriendo todas sus propiedades. También sucede esto si sólo se acerca la barra al imán, dejándola un tiempo arrimada. Al fenómeno se lo llamó: imantación por influencia.

La barra imanada constituye un imán artificial, que puede perder sus características, bien por medio del calor, sometiéndola a altas temperaturas; bien por la simple acción del tiempo. Dejando un imán artificial sin uso, se nota que va perdiendo lentamente su magnetismo. Para evitarlo, o por lo menos, para disminuir la pérdida, se pueden colocar barras de hierro dulce que tomen los extremos de la barra imanada.

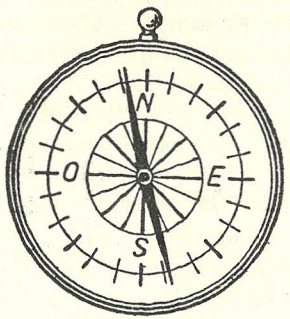

FIG. 7. — Aspecto de una brújula magnética.

Una explicación muy interesante del magnetismo la tenemos en la *brújula*, que es un aparato que tiene una aguja imanada liviana que está apoyada en un eje para que pueda girar libremente. Debajo tiene una escala con indicaciones de los puntos cardinales (figura 7). El funcionamiento se basa en los hechos siguientes:

1) Se ha observado que un imán tiene dos extremos de distintas características, por lo que se los llamó: polo norte y polo sur.

2) Polos de igual signo se rechazan y polos de distinto signo se atraen. Esto es similar a lo que sucedía con las cargas eléctricas.

3) El globo terráqueo es un enorme imán, con sus dos polos; por tal motivo, un imán que esté montado sobre un eje de modo que pueda girar, se moverá de manera que quede orientado en la dirección de los polos de la Tierra. Por error se designó Norte al polo magnético sur de la Tierra, y Sur al norte magnético, de manera que la brújula señala con su norte al norte geográfico, por atracción de polos de signo contrario (es evidente, puesto que el norte geográfico es el sur magnético). Son conocidas las aplicaciones de la brújula en la orientación marítima, de manera que no insistiremos en ello, pero veremos más adelante sus aplicaciones en Electricidad.

Magnetismo producido por la corriente eléctrica

De la observación de ciertos fenómenos por investigadores, se dedujo que la corriente eléctrica, al circular, origina fenómenos magnéticos. En efecto, si acercamos una brújula a un conductor por el que circula corriente eléctrica, se nota que la aguja se desvía, acusando la presencia de fuerzas magnéticas. Si se invierte el sentido de la circulación de la corriente, la desviación de la aguja se cumple en sentido contrario.

También se pudo observar que esos fenómenos magnéticos tenían lugar en todo el contorno del conductor, pues poniendo la brújula en cualquier posición se notaba el efecto de desviación. A toda la zona afectada se la llamó *campo magnético* y en él se manifiestan las fuerzas capaces de atraer las partículas de hierro que fueron mencionadas antes.

A los efectos de visualizar de alguna manera el campo magnético y sus efectos, Faraday propuso una ingeniosa representación de dicho campo. Consiste en suponer que se coloca una partícula de hierro cerca de un imán o en la zona o campo magnético. Por efecto de las fuerzas actuantes, esa partícula se desplazará siguiendo una trayectoria. Esa línea formada se denomina: *línea de fuerza*, y habrá muchas, porque se puede colocar una partícula en cualquier lugar del campo magnético observándose una trayectoria distinta. Así puede representarse un campo magnético por una serie de líneas imaginarias, que en el caso de los imanes van del polo Norte al Sud.

Ahora bien, cuanto más magnetismo tenga un imán, más intenso será el campo magnético. Para poder expresar la intensidad del campo magnético en alguna forma, se propuso medirla por la cantidad de líneas de fuerza. Luego, un campo magnético se mide por la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan un centímetro cuadrado normal a ellas. Colocando, entonces, un cuadradito de un centímetro de lado perpendicularmente a las líneas de fuerza, se supone que el número de líneas que lo atraviesan mide la intensidad de ese campo magnético.

Hablemos del magnetismo producido por las corrientes eléctricas, y veremos que podemos también aplicar esas convenciones. Cuanto más intensidad tenga la corriente, más intenso será el campo magnético producido alrededor del conductor, y entonces diremos que hay más líneas de fuerza por centímetro cuadrado. También se suele llamar Gauss a la cantidad de líneas de fuerza por centímetro cuadrado, de modo que un campo de 200 Gauss quiere decir que es un campo que tiene 200 líneas por centímetros cuadrado.

Solenoides

El hecho que en el entorno de un conductor recorrido por corriente exista un campo magnético, hizo pensar en la ventaja de arrollar al conductor, para tener en la parte interior del arrollamiento un campo muy intenso. Al efecto, ese arrollamiento se llama: bobina o solenoide, y presenta el aspecto de la figura 8. La ilustración corresponde a un bobinado de una sola capa, pero puede hacerse con varias, superpuestas, que es la forma como aparece generalmente en la práctica. Además, las espiras o vueltas pueden estar arrimadas unas a otras, para lo cual se emplea el conductor aislado.

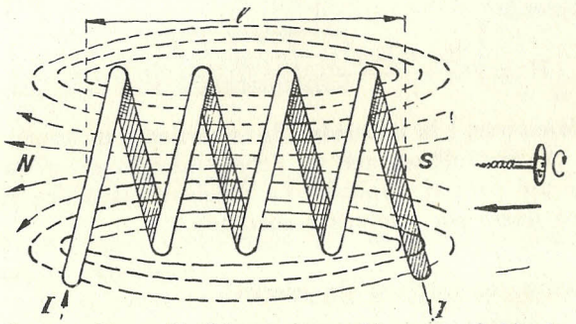

FIG. 8. — Formación del campo magnético por un bobinado o solenoide.

Las líneas de fuerza tienen la forma que se ve en la figura, de modo que el solenoide forma un verdadero imán, debiendo tener un polo Norte y uno Sur. Acercando la brújula a cada extremo se ve en seguida cuál es el Norte y cuál es el Sur, y se ve también que si se cambia el sentido de circulación de la corriente en la bobina, cambia la polaridad magnética del electroimán (figura 9).

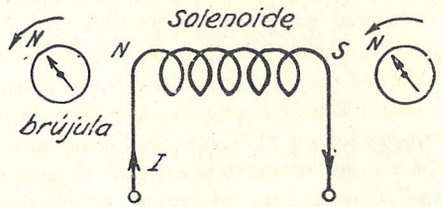

FIG. 9. — Si acercamos una brújula a una bobina se reconocen los polos magnéticos por la desviación del norte de la aguja de la brújula.

Para encontrar rápidamente la polaridad magnética que corresponde a un solenoide, se puede aplicar la regla práctica debida a Maxwell y que se llama "del tirabuzón". Consiste en hacer girar a un tirabuzón según el sentido en que la corriente recorre la bobina, tal como se indica en la figura 8. El eje del aparatito coincide con el de la bobina y el avance determina su salida por

el extremo que corresponde al Norte magnético. En el caso de la figura la salida se producirá por la izquierda, de modo que se indicó tal polaridad. Esta regla tiene aplicación inmediata en electroimanes, relevadores, generadores y motores eléctricos, etcétera.

Campo en el interior del bobinado

Dentro del solenoide el campo magnético se concentra, y la densidad del mismo depende del número de espiras que tenga y de si ellas ocupan mucha o poca longitud, pues es evidente que la concentración será mayor si acortamos el bobinado sin reducir la cantidad de espiras. Además, como es lógico, la densidad del campo magnético depende de la intensidad de la corriente que recorre el bobinado.

Para determinar la intensidad del campo magnético en el interior del bobinado se emplea la expresión:

$$H = \frac{0{,}4\ \pi\ N\ I}{l}$$

Donde *N* es el número de espiras, I la intensidad de la corriente en Amper, *l* la longitud del bobinado en centímetros, que no debe confundirse con la longitud del alambre que se usó para el arrollado. La densidad magnética H se obtiene en Gauss, o sea en líneas por centímetro cuadrado.

Imantación de núcleos de hierro

Si colocamos una barra de hierro dentro de la bobina de la figura 8, se notará de inmediato que en esa barra la concentración magnética es mayor. Todo pasa como si la barra de hierro fuera más permeable a las fuerzas del campo magnético, las dejara pasar con más facilidad. Esa propiedad del hierro se llama precisamente: *permeabilidad magnética*, y a la concentración magnética en el núcleo se la designa *inducción magnética*. Pero lo interesante es que si se aumenta la intensidad del campo (por aumento de la corriente), se nota que la barra de hierro se va haciendo menos permeable, como si al haber más intensidad en el campo magnético, la barra se fuera "llenando" y perdiera permeabilidad. Tal fenómeno se llama *saturación magnética*, y se va haciendo cada vez mayor a medida que el campo es más intenso.

La inducción magnética, o cantidad de líneas de fuerza por cm² de sección transversal en el núcleo, no tiene una dependencia directa con la intensidad del campo magnético en que se coloca a dicho núcleo. La saturación hace que la inducción no crezca en la misma proporción en que se hace crecer a la intensidad de campo. Conocidos los valores de la inducción y la intensidad de campo se determina la permeabilidad por el cociente:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Donde μ es la permeabilidad magnetica y B la inducción magnética.

Supongamos que hacemos una instalación como la de la figura 10, con una bobina arrollada sobre un núcleo de hierro, y cuyo circuito eléctrico incluye una resistencia variable que permite regular la intensidad de corriente.

La intensidad del campo magnético en el interior del solenoide, es directamente proporcional a la intensidad de corriente que recorre la bobina, pues las demás magnitudes que intervienen en la expresión conocida son constantes para una bobina dada. Quiere decir que, variando la intensidad

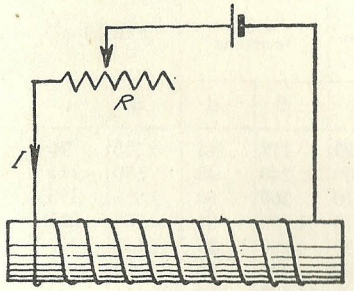

Fig. 10. — Circuito para determinar las características de imanación de un núcleo de hierro.

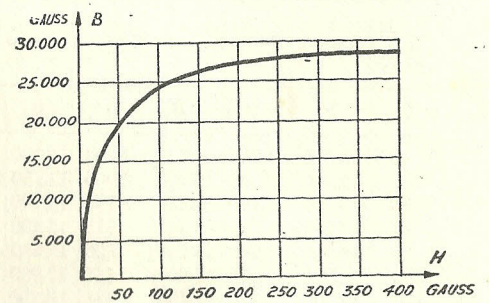

Fig. 11. — Curva virgen de imanación de un núcleo de hierro. Cada material tiene una curva similar a ésta.

de corriente, provocamos una variación proporcional de la intensidad del campo magnético.

En el núcleo tendremos una inducción magnética, que suponemos se pueda medir. Se toman distintos valores de la intensidad de campo, partiendo desde cero hacia las densidades magnéticas crecientes y se determinan los sucesivos valores correspondientes de la inducción magnética en el núcleo de hierro.

Haciendo un gráfico con los pares de valores, se obtiene una curva como la de la figura 11, que se denomina: "*curva virgen de imantación*". Se nota que, al principio, la inducción crece casi linealmente con la intensidad de campo magnético, pero luego comienza a tener influencia la saturación del núcleo y finalmente, por más que se aumente la corriente en la bobina, es decir, por más que crezca la intensidad de campo, no se tienen apreciables aumentos de la inducción magnética.

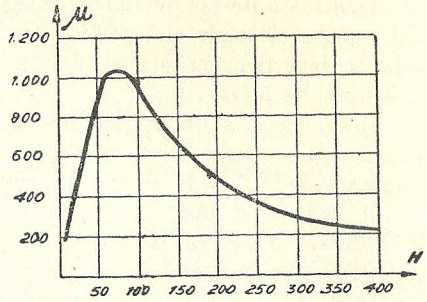

Fig. 12. — Variación de la permeabilidad del hierro al alterar el campo magnético.

El cociente entre la inducción y la intensidad de campo da la permeabilidad magnética, luego se puede hacer ese cociente para cada par de valores y obtener una curva que dé los valores de la permeabilidad en función de la intensidad de campo. Es el gráfico de la figura 12, en el que se nota que

el valor de la permeabilidad crece hasta un máximo para decrecer paulatinamente luego, debido a los efectos de la saturación magnética del núcleo.

Cualquiera de las dos curvas presta utilidad para resolver los problemas prácticos referentes a núcleos de hierro, los que no tienen una permeabilidad constante. Damos a continuación una tabla con los valores más comunes de la inducción y la permeabilidad magnética de distintos materiales empleados en la práctica.

Int. de campo magnético	Hierro dulce		Hierro forjado		Acero dulce		Acero templado		Fundición	
H	B	μ	B	μ	B	μ	B	μ	B	μ
2,5	10.500	4.200	6.000	2.400	9.300	3.720	112	45	235	94
5	12.900	2.580	10.000	2.000	12.150	2.430	240	48	570	114
10	14.600	1.460	12.430	1.243	14.100	1.410	500	50	1.960	196
20	15.700	785	14.260	713	15.450	775	1.120	56	4.700	235
50	16.900	340	15.920	320	16.830	335	4.280	86	7.520	150
100	17.930	179	16.900	169	17.980	180	9.820	98	9.320	93
150	18.700	125	17.450	116	18.750	125	11.670	78	10.500	70
200	19.400	97	18.000	90	19.509	97	12.900	64	11.430	57
300	20.200	67	18.670	62	20.400	68	14.320	48	12.550	42
500	21.200	42	20.000	40	21.450	43	15.400	30	13.900	28

Histéresis magnética

Realicemos nuevamente el montaje de la figura 10, para tener variaciones de la intensidad del campo magnético, producidas regulando la corriente con la resistencia variable, pero incluyamos un dispositivo para invertir el sentido de circulación de esa corriente. Sabemos que el sentido de las líneas de fuerza del campo depende del sentido de la corriente, de modo que al invertir ésta, se invertirá también el sentido del campo, y, por ende, la inducción en el núcleo de hierro.

Si se llevan a un gráfico los valores de la inducción y la intensidad de campo, para valores crecientes de esta última, se obtiene la curva virgen de imantación, OS de la figura 13, similar a la figura 11.

Si llegado al punto S, se hace disminuir la intensidad de corriente en la bobina, decrecerá la intensidad de campo y la inducción, pero no se obtendrán los mismos valores que para la curva inicial, sino que la inducción se mantendrá siempre por encima de la curva virgen, según la curva SA. De modo que, anulándose la intensidad de corriente, es decir, cuando ya no existe el campo magnético en la bobina, persiste un valor de la inducción, esto es, el núcleo queda magnetizado con un valor 0A, llamado: *magnetismo remanente.*

Esto explica la producción de imanes artificiales, con trozos de hierro que se colocan dentro de campos magnéticos. Al retirarlos, quedan imantados.

Si se invierte ahora el sentido de la corriente, el campo cambia de sentido, y se tienen valores hacia el otro lado del eje vertical. Para un cierto valor del campo, la inducción se anula. Ese valor de la intensidad de campo, 0B, se llama: *fuerza coercitiva.*

Si se sigue aumentando en el nuevo sentido la intensidad de campo, se llega al punto S′ que es simétrico al S, y que también es el punto de saturación del núcleo.

Disminuyendo ahora el valor de la corriente, se llega al punto A′, simétrico del A, que da el valor del magnetismo remanente 0A′, igual al 0A, la fuerza coercitiva 0A′, igual llegando finalmente al punto S, después de describir una figura cerrada, llamada: *"ciclo de histéresis"*.

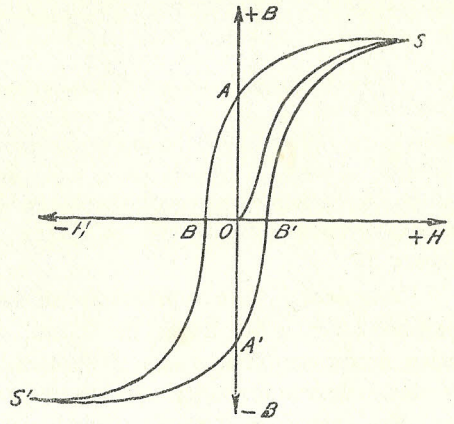

FIG. 13. — Gráfico de la histérisis magnética.

La superficie encerrada por el ciclo de histéresis representa un cierto trabajo de imantación, directamente proporcional a aquella, que se transforma en calor. Los núcleos de las bobinas sometidas a campos magnéticos variables sufren el fenómeno descripto, por lo que experimentarán una elevación de temperatura, que debe preverse en los cálculos técnicos.

Steinmetz da una fórmula empírica para cualcular las pérdidas por histé resis, referidas a un Kilogramo de núcleo:

$$W = \eta f B^{1.6}$$

donde la potencia de pérdidas está dada en Watt; f es el número de ciclos cumplidos en un segundo; B es la inducción máxima a que se llega y η un coeficiente numérico cuyo valor para los materiales comunes es:

Chapas de acero dulce	$2{,}7 \times 10^{-3}$
Chapas de acero dulce con 2 % silicio.....	$1{,}5 \times 10^{-3}$
Chapas de acero dulce con 4 % silicio.....	$1{,}0 \times 10^{-3}$

Fuerzas electromagnéticas

Hemos representado a los campos magnéticos mediante líneas de fuerza, y se ha visto que la forma de dicho campo, comprendido entre dos polos de distinto nombre, norte y sur, era un conjunto de líneas paralelas, cuyo sentido era el que corresponde a la dirección norte-sur. El mismo campo puede ser originado por un solenoide recorrido por corriente eléctrica, y cuya polaridad magnética se determina mediante la regla del tirabuzón.

A fin de apreciar más claramente los fenómenos que describiremos a continuación, emplearemos una representación frontal, por así decirlo, del

campo magnético. Si nos colocamos en la dirección de las líneas de fuerza, por ejemplo en el polo sud (figura 14, a), veremos a las líneas de frente, dirigiéndose hacia nosotros; a esto lo representamos como en b, de la misma figura.

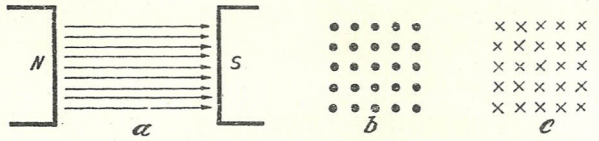

FIG. 14. — Representación frontal de un campo magnético.

Si, en cambio, nos colocamos en la misma dirección, pero en el polo norte, veremos a las líneas desde atrás, y lo representamos como en c, de la figura 14.

Resumiendo, para representar un campo magnético cortado por un plano perpendicular a las líneas de fuerza, se emplean puntos cuando las líneas salen desde ese plano hacia el observador, y cruces cuando se dirigen desde el plano hacia la dirección opuesta en que se halla el observador. Puede decirse, también, que el esquema b corresponde a un campo magnético saliente del papel, y que el c se refiere a un campo entrante al papel.

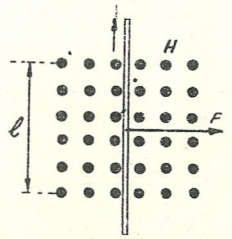

FIG. 15. — Un conductor recorrido por corriente dentro del campo es sometido a una fuerza de desplazamiento.

La razón de estas aclaraciones es la siguiente: en la representación común del campo por líneas paralelas (figura 14, a), no se ve si un conductor corta a las líneas perpendicularmente, ni aun si su movimiento es en un sentido o en el otro.

Imaginemos ahora un campo magnético saliente (ver figura 15), en el cual se coloca un conductor rectilíneo. Sabemos que si ese conductor está recorrido por corriente eléctrica, se producirá un campo magnético que actuará sobre masas magnéticas colocadas en las inmediaciones, acciones que se manifiestan en forma de fuerzas.

Entre el campo magnético que teníamos, y en el cual está sumergido el conductor, y el que forma la corriente en torno a dicho conductor, se originan también fuerzas, que tenderán a desplazar a la corriente o al campo. Si el dispositivo que produce al campo magnético es fijo (imán o solenoide), la fuerza actuante desplazará al conductor en cierto sentido, indicado en la figura.

De manera, pues, que si un conductor está recorrido por corriente eléctrica, y sumergido en un campo magnético, se originará una fuerza que tenderá a desplazarlo del campo.

El valor de dicha fuerza es tanto mayor cuanto más intenso sea el campo, cuanto mayor sea la intensidad de corriente I y cuanto más largo sea el

conductor, en su porción útil l que es la parte que está dentro del campo de intensidad H. Resulta entonces el valor de dicha fuerza dado por el producto de esas magnitudes:

$$F = 0{,}1\ H\, l\, I$$

expresada en dinas. El coeficiente 0,1 es para poder tomar la intensidad en Amper, y no en Weber (Unidad electromagnética). Para tener la fuerza en Kilogramos se divide por 981.000.

La fuerza actuante moverá al conductor en dirección perpendicular a las líneas de fuerza del campo, y para encontrar el sentido de ese movimiento, se aplica una regla práctica, llamada: de la *mano izquierda*. Si se coloca la palma de la mano de manera que reciba las líneas de fuerza perpendicularmente a la palma, entrando por ella, y los cuatro dedos juntos, desde el índice al meñique, indicando la dirección de la corriente eléctrica, el pulgar determina el desplazamiento del conductor si se lo separa del resto de la mano en dirección perpendicular al dedo índice (ver figura 16).

Así, en el caso de la figura 15, la palma debe apoyar en el papel, para recibir perpendicularmente las líneas de fuerza, que son salientes. Los cuatro dedos estirados deben señalar hacia arriba, pues ése es el sentido de la corriente I. El pulgar indica hacia la derecha, y tal es el sentido del desplazamiento del conductor.

Cambiando el sentido de cualquiera de los dos agentes que intervienen en la acción electromagnética, la corriente o el campo, cambia también el sentido de la fuerza. Si cambian a la vez los sentidos de ambos, la fuerza mantiene su dirección y sentido.

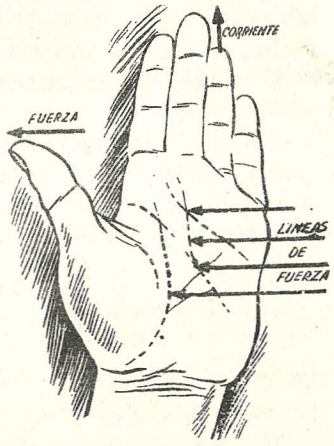

FIG. 16. — Regla práctica de la mano izquierda para determinar el desplazamiento.

Otra regla práctica, debida a Flemming, consiste en colocar los tres dedos, pulgar, índice y medio de la mano izquierda, de manera que estén perpendiculares entre sí; el pulgar señala el sentido de las líneas de fuerza, el índice el de la corriente, resultando el mayor señalando la dirección de la fuerza.

Debido a que la aplicación inmediata de las fuerzas electromagnéticas está en los motores eléctricos, y que hay otros fenómenos para los cuales la regla práctica utiliza la mano derecha, se acostumbra a llamar a la izquierda: *mano motora*, para evitar confusiones al aplicar una regla práctica.

Inducción electromagnética

La experiencia enseña que la aparición de fuerzas electromagnéticas es un fenómeno reversible, es decir, que moviendo conductores dentro de campos magnéticos se originan corrientes eléctricas. El hecho se manifiesta por la existencia de una fuerza electro-motriz, que se constata entre los extremos del conductor, y que da lugar a una corriente en cuanto se cierra el circuito para que circule.

Consideremos, por ejemplo, un campo magnético representado de acuerdo a la convención hecha anteriormente, que sea saliente del plano del papel (ver figura 17). Coloquemos dentro de él un conductor, cuya longitud útil será la porción comprendida dentro del campo (largo útil l). Si desplazamos rápidamente el conductor hacia la derecha, con velocidad v, indicada en la figura, se inducirá una f.e.m. cuyo valor y signo se pueden determinar.

Calculemos primeramente el valor de la f.e.m. mencionada. La intensidad del campo magnético es H (Gauss); la velocidad del desplazamiento del conductor, es decir, la distancia recorrida por el mismo en la unidad de tiempo es v, tomada en centímetros por segundo (cm/s). La longitud útil l, la tomamos en cm.

La f.e.m. será tanto mayor cuanto más intenso sea el campo magnético, cuanto más rápido sea el movimiento y cuanto más largo sea el conductor en su parte sumergida en el campo. El valor de la f.e.m. será entonces proporcional al producto de esas tres magnitudes, de modo que se tiene:

$$e = \frac{H\,l\,v}{10^8}$$

donde el divisor es una constante numérica para reducir el resultado a Volt, que es la unidad práctica de f.e.m.

El valor del denominador hace pensar que para tener una f.e.m. de valor apreciable se debe tomar un conductor muy largo, sumergido en un campo magnético muy intenso y moverlo vertiginosamente. En la aplicación inmediata de este principio, que son las máquinas generadoras de electricidad, único procedimiento industrial para generar corriente eléctrica en gran escala, se recurre a las soluciones mencionadas.

Introduciendo algunas modificaciones en la fórmula general de la f.e.m. inducida, se llega a la expresión de Faraday, que rige todos los fenómenos de inducción electromagnética. En efecto, imaginemos que tomamos un conductor de longitud útil l, y que lo desplazamos a través de una distancia d en un tiempo t, de modo que la velocidad de desplazamiento será, por definición:

$$V = \frac{d}{t}$$

que puede ser reemplazada en la fórmula general de la f.e.m. inducida, obteniéndose:

$$e = \frac{H\,l\,d}{10^8\,t}$$

Pero obsérvese que el producto: $l\,d$, no es otra cosa que el área barrida por el conductor en su movimiento, área que está totalmente atravesada por líneas de fuerza del campo magnético.

Como el producto de la intensidad de campo por un área da por definición el flujo magnético a través de esa superficie o sea la cantidad total de línea de fuerza que la atraviesa, el numerador de la última expresión no es otra cosa que el flujo cortado por el conductor al desplazarse. Este flujo no es el total disponible, sino solamente la parte cortada, que llamaremos: *variación del flujo*, durante el tiempo t, que dura el movimiento. Para significar que solo se considera esa variación de flujo, utilizaremos el símbolo $\triangle$ que afecta al flujo y al tiempo durante el cual se ha cortado ese flujo. Nos queda:

$$e = \frac{\triangle \Phi}{\triangle t\,10^8}$$

que es la expresión de la ley de Faraday, que se emplea toda vez que se corta un flujo con un conductor, o que un campo barre al conductor.

La fuerza electro-motriz inducida está dada, pues, por la relación entre la variación del flujo producida y el tiempo tardado en producirla. Puede decirse también, que está dada por el flujo cortado o variado en la unidad de tiempo. El coeficiente numérico que afecta a la expresión se coloca para tener el resultado en Volt.

Faraday dió una regla muy práctica para determinar rápidamente el sentido de la corriente que se induce en el conductor por su desplazamiento. Se llama: *regla de la mano derecha*, y consiste en colocar tal mano estirada, de modo que las líneas de fuerza entren perpendicularmente por la palma, y el pulgar, apartado del resto de la mano, señale la dirección del movimiento del conductor. Los demás dedos estirados indican el sentido de la f.e.m. inducida (ver figura 18).

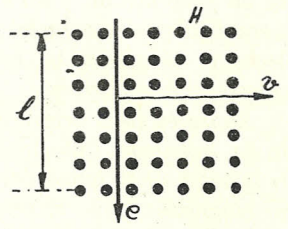

FIG. 17. — Un conductor que se desplaza en un campo magnético sufre fenómenos de inducción electromagnética.

Así, en el caso de la figura 17, la mano se debe colocar con la palma vuelta hacia el papel y el pulgar señalando hacia la derecha. Los dedos indican hacia abajo, de modo que se justifica la flecha que hemos colocado para indicar el sentido de la f.e.m. inducida e.

También Flemming aplicó a este caso su regla de los tres dedos, pero tomando la mano derecha en lugar de la izquierda. Colocando los tres dedos, pulgar, índice y mayor, de modo que queden perpendiculares entre sí, el pulgar indica la dirección del campo magnético, el mayor el movimiento del conductor y el índice nos determina el sentido de la f.e.m. inducida.

Inducción mutua

Estudiaremos ahora los fenómenos que ocurren en un circuito en el cual se varía la intensidad de corriente. Primeramente trataremos el caso en el que hay conductores vecinos al circuito considerado.

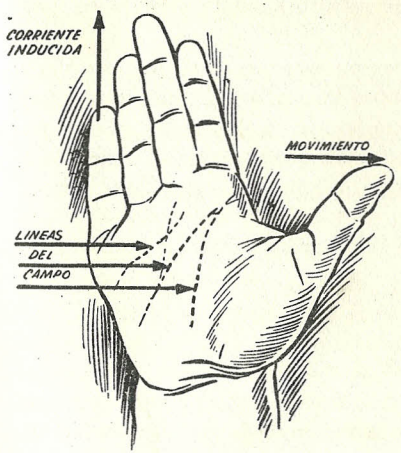

Fig. 18. — Regla práctica de la mano derecha para determinar el sentido de la f.e.m. inducida.

Supongamos al efecto que se dispone un conductor (1), paralelamente a otro (2) (ver figura 19), formando parte el primero de un circuito eléctrico cerrado, con una pila y una resistencia variable. Al circular corriente I por el conductor (1), se establece en su alrededor un campo magnético con líneas circulares concéntricas. El conductor (2) estará sumergido en ese campo. Pero veamos qué ha sucedido mientras tanto.

Al formarse el campo magnético, las líneas de fuerza han barrido al conductor (2), y ello debe haber originado la inducción de una f.e.m. en el mismo. Para encontrar el sentido de tal f.e.m. hagamos la siguiente suposición.

Si la línea de fuerza más exterior ha cortado primero al conductor (2), después la que le sigue, con un diámetro un poco menor, y así sucesivamente, lo mismo hubiera sucedido si el campo fuera fijo y el conductor (2) lo hubiéramos desplazado en el sentido de la flecha a, porque en tal forma también se cortaría primero a la línea exterior y después a las demás.

Ahora es fácil determinar el sentido de la corriente inducida, con auxilio de la regla de la mano derecha. El campo magnético tiene el sentido indicado en la figura, que se encuentra con la regla del tirabuzón. La f.e.m. inducida tiene el sentido e, indicado en la parte inferior del conductor (2), que es, como se ve, contrario al de la corriente en el conductor (1).

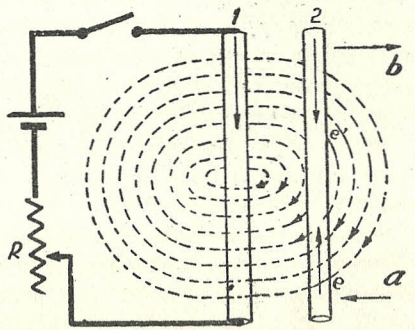

Fig. 19. — Forma en que se produce la inducción mutua.

Si el conductor (2) tiene un circuito cerrado, la corriente que circulará producirá un campo magnético con sentido contrario al del conductor (1), que tenderá, pues, a anularlo. Esto confirma la ley de Lenz, pues la corriente inducida trata de anular la causa que le da origen, que es la circulación en el conductor (1).

Supongamos ahora que abrimos el interruptor del circuito (1), con lo que la corriente I disminuirá hasta anularse, sucediendo lo propio con su campo magnético circundante. Las líneas de fuerza, al desaparecer, cortarán al conductor (2), primero las más internas y finalmente la exterior. Todo pasa como si el conductor lo retiráramos bruscamente en el sentido de la flecha b.

En tales condiciones, la f.e.m. que se induce, de acuerdo con la regla de la mano derecha, tiene el sentido indicado e', en la parte superior del conductor (2); como se ve, coincide con la dirección de circulación de la corriente I en el conductor (1). Si la f.e.m. inducida e' produce circulación de corriente, la misma forma un campo magnético que se adiciona al de I, es decir, trata de que este último no desaparezca. También en este caso, la corriente inducida se opone a la causa que la genera, que es la desaparición de la corriente I.

Lo mismo que ha sucedido al establecerse la corriente en el circuito (1), y al anularse, pasa si sólo varía dicha corriente, lo que puede hacerse con la resistencia R. Si aumentamos la corriente I, se inducirá una f.e.m. en el conductor (2), con sentido contrario a la circulación de I. Si la disminuimos, también se inducirá, pero con sentido igual al de I. Está claro que siempre la f.e.m. inducida trata de anular la causa que le da origen. Como no puede anularla totalmente, porque la fuente continúa suministrando corriente al circuito (1), su influencia se nota durante un corto lapso.

Autoinducción

Hemos visto cómo se inducía una corriente eléctrica, en un conductor vecino a otro, en el cual variaba la intensidad de corriente que lo recorría. La variación podía ser el caso de cerrar o abrir el circuito, pues la corriente pasa del valor cero al valor normal o viceversa.

Si se tiene una sola bobina, formando un circuito cerrado (ver figura 20), con su fuente de tensión y su resistencia variable, sin disponer de bobina secundaria, veamos lo que sucede:

Si se varía la intensidad de corriente, el campo magnético del interior del solenoide experimenta, a su vez, una variación. Las líneas de fuerza abarcan a todas las espiras de la bobina, de modo que cualquier desplazamiento sufrido por el campo magnético barrerá los conductores de las espiras y ya sabemos que ello provoca la inducción de una f.e.m.

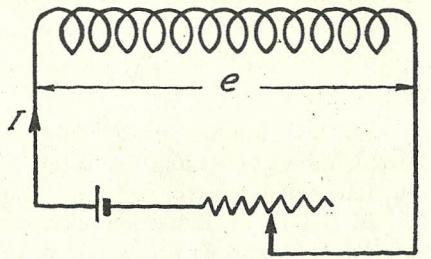

Fig. 20. — Forma en que se produce la autoinducción.

Se ve claro que, pese a tener una sola bobina, al variar la corriente, y con ella el campo magnético, se producirá un corte de líneas de fuerza del campo por los conductores de esa

bobina y, por ende, inducción de un f.e.m. que se llama: *de autoinducción.*

Todo pasa como si se tratara de dos bobinas, de igual número de espiras, encimadas, en una de las cuales se produjera la variación de corriente y en la otra la inducción de la f.e.m., tal como se describió en la figura 19. Será fácil, entonces, averiguar el valor de la f.e.m. de autoinducción.

El fenómeno de autoinducción se presenta, en la práctica, toda vez que se cierra o se abre un circuito que contiene una bobina, o, simplemente, si varía la intensidad de corriente en el mismo. Hay ocasiones en que se lo aprovecha con fines útiles, y otras, en las que puede resultar perjudicial, por lo que debe tenerse en cuenta, diseñando dispositivos de protección, pues la tensión inducida puede alcanzar valores muy elevados. En el estudio de máquinas eléctricas, por ejemplo, se verá que en el conmutador o colector de las mismas se produce continuamente la interrupción de un circuito formado por una bobina, apareciendo el fenómeno de autoinducción, descar

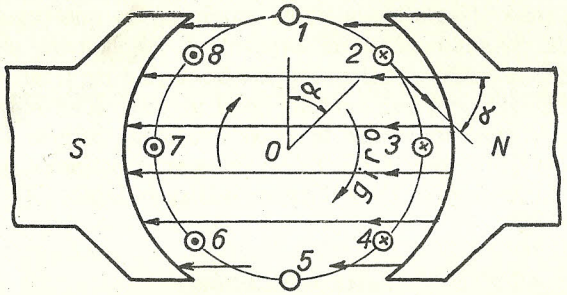

FIG. 21. — Principio elemental de un generador de corriente alternada.

gándose la f.e.m. inducida en forma de chispas entre la escobilla y el colector. En corriente alternada, siempre aparece este fenómeno, pues al ser variable la corriente, lo será también el campo magnético que circunda a los conductores. Un caso de utilidad práctica lo constituyen los auto-transformadores, en los que se aprovecha la autoinducción con fines útiles.

LA CORRIENTE ALTERNADA

En los circuitos vistos anteriormente se ha supuesto que la corriente circulante era continua, es decir, tenía una dirección constante y mantenía su intensidad invariable, salvo que intencionalmente se la hiciera variar.

Al hablar de inducción electromagnética dijimos que bastaba mover un conductor dentro de un campo magnético para generar una corriente eléctrica. Por razones prácticas, utilizamos una espira en vez de un conductor. Veamos qué ocurre:

Tenemos entonces una espira que hacemos girar dentro de un campo magnético y cuyas sucesivas posiciones se ilustran en la figura 21. En la

posición 1 no corta al campo magnético, luego no puede haber inducción de tensión. En las posiciones de 2 a 4 el conductor corta a las líneas del campo en un sentido determinado y en posiciones 6 a 8 lo corta en sentido contrario.

Además se observa que en la posición 3 el movimiento del conductor es perpendicular a las líneas de fuerza, mientras que en posiciones como la 2, la 4, etcétera, el movimiento es oblicuo. De esto se deduce que la tensión inducida en 3 ó en 7 será de mayor valor que en las otras posiciones, ya que a igual recorrido corta más líneas de fuerza del campo.

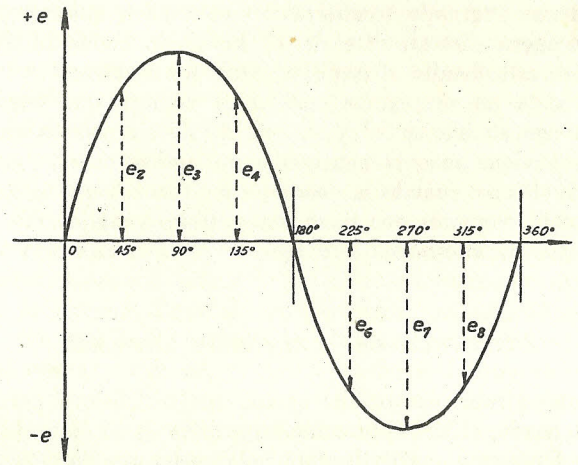

FIG. 22. — Valores instantáneos que toma la tensión inducida durante una vuelta.

Otro detalle interesante es que durante media vuelta el sentido del movimiento es descendente y durante la otra media es ascendente. Esto se traduce en una inversión de la polaridad de la tensión inducida, es decir que a circuito cerrado la corriente cambiará su sentido de circulación.

En la figura se han indicado las distintas polaridades de la tensión con cruces y puntos dentro del conductor. Además para reconocer el ángulo que va formando la dirección del movimiento con las líneas del campo magnético, se lo indica con la letra α. Nótese que este ángulo coincide con el que forma cada posición del conductor con la posición inicial 1.

Si se hace un gráfico con los sucesivos valores de la tensión durante una vuelta completa, se tiene la curva de la figura 22, que se llama sinusoide. Se han dibujado los ocho valores para las posiciones indicadas en la figura, y después se unieron los puntos obtenidos con una línea curva. Las posiciones 1, 5 y 9 tienen valor cero.

Hemos tomado hacia arriba las tensiones que tenían una cruz como signo, y hacia abajo las que tenían un punto. Al tener signos contrarios, una puede ser considerada como positiva y la otra como negativa. El ángulo α va desde 0° a 360° en una vuelta completa.

Analicemos los resultados: la tensión obtenida en una vuelta (y en las demás será igual, pues el fenómeno se repite), cambia de polaridad dos veces por vuelta, y sus valores son constantemente variables desde cero hasta un valor máximo, vuelven a cero, y así sucesivamente. Si el circuito es cerrado, circulará una intensidad de corriente de idénticas características; la intensidad de esa corriente será variable y su dirección de circulación se invierte dos veces durante el tiempo que dura la vuelta. Una tensión y una corriente de tales características son *alternadas.*

Puntualicemos: si en un generador de corriente continua no se colocara el colector, se recogería corriente alternada y no continua. Luego un generador de corriente alternada o *alternador* no tendrá colector, sino que la corriente se recogerá directamente de su bobinado inducido. Más adelante volveremos sobre este detalle al estudiar estos generadores.

A primera vista no se percibe cuál es la ventaja que puede tener una corriente que tenga su intensidad y su sentido de circulación variables, pues parecería que conviene más la continua, con ambas cosas constantes. Pero a poco que se analice, y cuando se conozcan las razones que la han hecho imponer a la primera, veremos que tiene indiscutibles ventajas. Ya hemos visto, por lo pronto, que un alternador será más simple que una dinamo, al faltarle el colector.

Frecuencia de la corriente alternada

La espira que giraba dentro del campo magnético nos permitía obtener una tensión alternada, cuya representación gráfica es la sinusoide de la figura 22. Pero este fenómeno ocurre durante cada vuelta que da la espira, de modo que si representáramos gráficamente la tensión alternada durante un tiempo largo tendríamos un grupo de sinusoides sucesivas.

Cada sinusoide completa se llama *ciclo* de la corriente alternada y el número de ciclos que ocurre en un segundo se llama *frecuencia.* El número que mide la frecuencia coincide en este caso con la cantidad de vueltas que da la espira en un segundo.

El tiempo que tarda la espira en dar una vuelta o sea la duración de un ciclo se llama *período.* En la práctica la corriente industrial suele ser de 50 períodos o ciclos por segundo, que se abrevia: 50 c/s. Para corriente alterna de alta frecuencia, como son las que se utilizan en radio, la cantidad de ciclos por segundo es del orden de los miles o los millones por cuya razón suelen utilizarse los múltiplos Kilociclos (Kc/s) y Megaciclos (Mc/s) ambos referidos también a un segundo.

Valores característicos

Si retomamos el gráfico de la figura 22 veremos que se ha indicado con la letra *e* y con el sub-índice que corresponde a la posición de la espira a los sucesivos valores que toma la tensión alterna durante un ciclo.

Los valores máximos corresponden a las posiciones 3 y 7 y se llaman valor de *cresta, de pico, máximo* o *amplitud.* Uno de ellos es el pico positivo y el otro el pico negativo.

En la práctica de los circuitos suele tomarse para los cálculos los valores que corresponden a las posiciones 2, 4, 6 u 8, que se llaman *valor eficaz.* La razón estriba en que ese valor es el promedio cuadrático o promedio de los valores de la tensión elevados al cuadrado.

Justificaremos el empleo del valor eficaz en los circuitos prácticos. Si se quiere calcular el valor medio de la tensión alternada, notamos que como la curva tiene igual superficie arriba y abajo del eje, resulta cero. Quiere decir que si conectamos un voltímetro o un amperímetro polarizados, en un circuito de corriente alternada, indicarán cero. Y ello ocurre porque son iguales los impulsos que tienden a hacer girar la aguja hacia la izquierda o hacia la derecha. Utilizando en cambio un aparato no polarizado, en el cual la acción depende del cuadrado de la corriente o de la tensión, como las cantidades negativas elevadas al cuadrado resultan positivas, se tendrá que el instrumento indica el promedio de los impulsos cuadráticos, o sea el medio de los valores de la tensión elevados al cuadrado.

Como el trabajo o la potencia eléctrica se calculaba empleando el cuadrado de la tensión o de la intensidad, puede convenirse en que el promedio cuadrático de la tensión alternada la represente en los cálculos y la haga equivalente a una corriente continua que realiza el mismo trabajo eléctrico.

Resulta así que el valor eficaz de la corriente alterna es el que indican los instrumentos de medida, y el que permite asimilar numéricamente la corriente alternada a la continua, ya que para producir luz o calor sólo interesa la potencia eléctrica y no el sentido de circulación.

Si se conoce el valor de cresta, puede deducirse el valor eficaz, por medio de las leyes geométricas obtenidas de la sinusoide, y resulta:

$$I_e = 0{,}7\ I_m$$

Donde representamos con I_e al valor eficaz de la corriente y con I_m al valor máximo o de cresta. La cantidad 0,7 es aproximada, pues extendiendo los cálculos resulta más exacto 0,707. En la práctica se suele utilizar la cifra aproximada.

Si en cambio, calculamos prolijamente el *valor medio* para la mitad de un ciclo, obtenemos el valor:

$$I_{med.} = 0{,}637\ I_m$$

Este valor medio tendrá aplicación en el cálculo de bobinados del cap. XXV.

Circuitos de corriente alternada

Una bobina en un circuito de corriente alternada producirá fenómenos de autoinducción, puesto que éstos suceden toda vez que se hace variar la

corriente de circulación, y la alternada varía continuamente y con gran velocidad. Como la tensión inducida tiende a oponerse a la causa que la genera, sucederá que cuando la corriente alternada crece, la tensión de autoinducción disminuye y viceversa. Si se representan en un mismo gráfico la tensión de autoinducción en la bobina y la corriente que la recorre, se tendrán dos sinusoides como se ve en la figura 23. Las curvas no están superpuestas, sino que están *defasadas*. Se ve que la tensión está *adelantada* en su fase con respecto a la corriente, o, lo que es lo mismo, la corriente *atrasa* con respecto a la tensión.

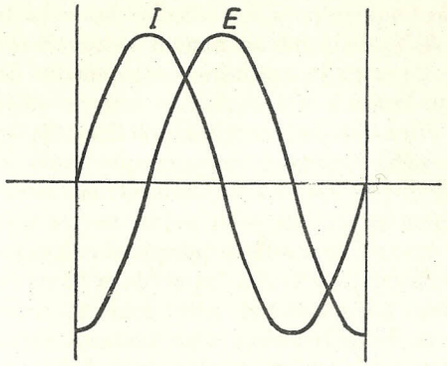

FIG. 23. — Onda de tensión adelantada con respecto a la corriente.

Luego, en circuitos con bobinas, se tendrá que la corriente está atrasada, es decir, los instantes en que ella es máxima, no son los mismos en los que la tensión es máxima y viceversa. Hay un cuarto de ciclo de diferencia entre ambas, o sea un ángulo de 90°.

Un capacitor en un circuito de corriente alternada produce un fenómeno contrario al de una bobina. Como la tensión entre sus armaduras cambia de signo continuamente, se cargará una vez en un sentido y otra en el contrario. Las cargas eléctricas estarán en un vaivén continuado, y todo pasa como si circulara corriente alternada por el circuito. Pero el desplazamiento de las cargas se hace mayor cuanto más varíe la tensión aplicada, y no hay movimiento cuando la tensión no varía. Luego, si se representan en ur mismo gráfico la tensión entre armaduras del capacitor y la corriente del circuito se obtendrá la figura 24, y se ve que las dos sinusoides están defasadas, adelantando la de la corriente. La tensión atrasa 90° con respecto a la intensidad de corriente.

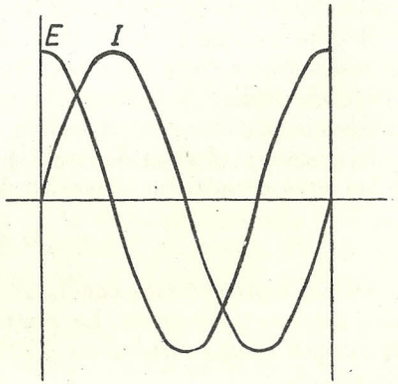

FIG. 24. — Onda de tensión atrasada con respecto a la corriente.

Ley de Ohm para corriente alternada

Hasta aquí hemos hablado de los efectos de una bobina o de un capacitor en un circuito de corriente alternada. Veamos ahora el cálculo de la intensidad

cuando se conoce la tensión y viceversa, lo que en corriente continua hacíamos mediante la ley de Ohm.

Una resistencia, una bobina o un capacitor ofrecen cierta dificultad al paso de la corriente alternada. El efecto de la resistencia es el mismo que en corriente continua, de modo que si sólo tuviéramos una resistencia en el circuito, emplearíamos la fórmula:

$$I = \frac{E}{R}$$

para calcular la intensidad de corriente, dada en Amper, cuando E se da en Volt y la resistencia R se da en Ohm.

Una bobina insertada en un circuito al paso de la corriente, ofrece una resistencia de carácter especial, que se llama *reactancia inductiva*, pues además de oponerse al paso de la corriente provoca un defasaje entre ésta y la tensión. La reactancia de la bobina se calcula así:

$$X = 6{,}28\ f\ L$$

Donde X es la reactancia inductiva, dada en Ohm cuando f es la frecuencia de la corriente alternada, dada en ciclos/seg. y L es la inductancia de la bobina, dada en Henry, y de acuerdo con una descripción que hicimos en el capítulo anterior sobre el fenómeno de autoinducción.

Un capacitor, intercalado en el circuito de corriente alternada, ofrece una dificultad al paso de la corriente que se llama *reactancia capacitiva*, que también provoca un defasaje de la corriente, pero inverso al de la bobina. La reactancia del capacitor se calcula así:

$$X = \frac{1.000.000}{6{,}28\ f\ C}$$

Donde X es la reactancia capacitiva en Ohm cuando f es la frecuencia dada en c/s y C es la capacidad o capacitancia del capacitor, en microfarad, que es la unidad más común.

En cualquiera de los dos casos, bobina o capacitor, para calcular la corriente en el circuito conociendo la reactancia, se emplea la ley de Ohm, con la corrección de usar X en vez de R:

$$I = \frac{E}{X}$$

Y las unidades son las mismas que antes, pues X se mide siempre en Ohm. De manera que cuando en un circuito de corriente alternada hay una resistencia, una bobina o un capacitor aisladamente, es decir, uno solo de tales elementos, no hay problema, pues aplicamos la misma fórmula, interviniendo R o X según el caso. Veamos lo que sucede cuando intervienen dos o más elementos.

Comencemos por una combinación de resistencia y bobina, según se ve en la figura 25. En los bornes tenemos una tensión E y circulará una corriente que queremos calcular. Sabemos que la tensión entre los extremos de la

resistencia estará en fase con la corriente, pues no sucede nada que la haga defasarse. Pero entre los extremos de la bobina la tensión adelanta 90° con respecto a la corriente. Luego vemos que la tensión de la toma y la corriente

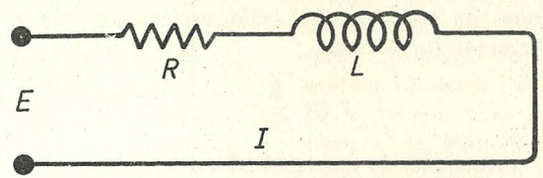

FIG. 25. — Circuito de corriente alternada con resistencia e inductancia.

del circuito no están en fase, pues esta última atrasa un ángulo φ. Para calcular la intensidad de corriente se emplea la fórmula:

$$I = \frac{E}{Z}$$

Donde Z es la *impedancia* del circuito o efecto combinado de la resistencia y la reactancia inductiva. El valor de Z es:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Y si se toman R y X en Ohm, Z resulta dada en esa misma unidad. Veamos ahora cómo se calcula el defasaje entre la corriente y la tensión:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Luego, conociendo la resistencia del circuito y la impedancia, por medición, por ejemplo, se puede saber cuánto atrasará la corriente, pues en la tabla de cosenos encontramos el ángulo.

Pasemos al caso de una resistencia combinada con un capacitor, según esquema de la figura 26. Haciendo las mismas consideraciones que hemos hecho para el circuito anterior, pero aclarando que la tensión en los bornes

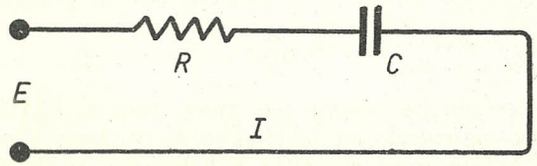

FIG. 26. — Circuito de corriente alternada con resistencia y capacidad.

del capacitor atrasa con respecto a la corriente; también en este caso se combinarán los efectos de la resistencia y del capacitor, ofreciendo, en conjunto, una *impedancia*:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Donde R es la resistencia y X la reactancia capacitiva (del capacitor) ambas en Ohm con lo que Z resultará en Ohm. La intensidad de corriente estará dada por el cociente ya conocido.

$$I = \frac{E}{Z}$$

Y vemos que el caso de combinación de reactancias con resistencias es muy parecido, ya sea una bobina o un capacitor. La diferencia está en que el defasaje de la corriente, que también en este ú timo caso se da por la fórmula del coseno, es ahora en adelanto, y para la bobina era en atraso.

Y finalmente, consideremos ahora el caso general en el que se tienen los tres elementos combinados; resistencia, bobina y capacitor, según el esquema de la figura 27.

Por análogas combinaciones llegaríamos a la conclusión que la intensidad está dada, también en este caso, por el cociente entre la tensión E y la impedancia total del circuito Z, pero en su cálculo deben intervenir los tres elementos. El valor de Z se calcula con la misma fórmula que hemos visto dos veces ya, pero haciendo la salvedad que la reactancia X que hay que

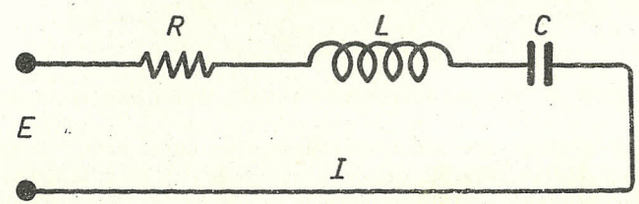

FIG. 27. — Circuito de corriente al ernada con resistencia, inductancia y capacidad.

colocar en tal fórmula está dada por la diferencia entre la reactancia de la bobina y la del capacitor:

$$X = X_L - X_C$$

Donde hemos puesto una letra como subíndice de las dos reactancias a restar, para distinguir la de la bobina y la correspondiente al capacitor.

Potencia de la corriente alternada

En corriente continua la potencia está dada por el producto entre la tensión y la intensidad. En alternada vale la expresión cuando esas dos magnitudes están en fase, en circuitos en los que hay resistencia pura, como son los de lámparas, calentadores, en fin, artefactos de luz o calor. Si hay bobinas o capacitores, la fórmula de la potencia se modifica con el agregado de un nuevo factor:

$$W = E\ I \cos \varphi$$

Que ya no es conocido, y que por aparecer en esta expresión se suele llamar: *factor de potencia*. Conociendo, pues, la tensión, la intensidad de corriente y el coseno del ángulo de defasaje entre ésta y la tensión, se puede calcular la potencia puesta en juego en el circuito.

Circuitos trifásicos

Hasta aquí hemos supuesto que dentro del campo magnético se movía un solo conductor, o un bobinado completo, pero uno solo, y que la tensión en tal conductor tenía una fase de variación sinusoidal. El circuito se formaba como cualquiera de las figuras 12, 13 ó 14. Tales circuitos se llaman *monofásicos*.

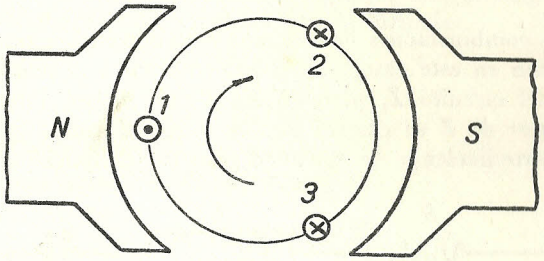

Fig. 28. — Principio del generador trifásico de corriente alternada.

Supongamos ahora que colocamos dentro de aquel campo magnético tres conductores aislados entre sí, según se ve en la figura 28. Están apartados de 120° unos de otros, y giran manteniendo ese ángulo. En cada uno de ellos se obtendrá una tensión alternada sinusoidal, que estarán defasadas entre sí

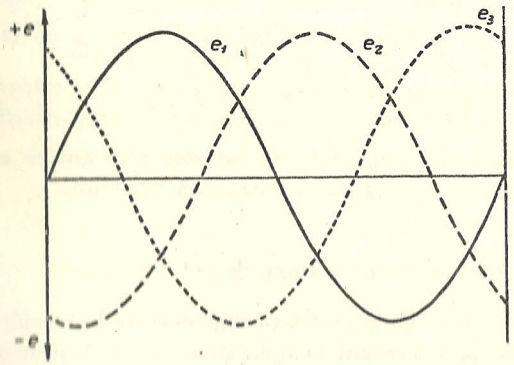

Fig. 29. — Ondas de tensión resultantes de un sistema trifásico.

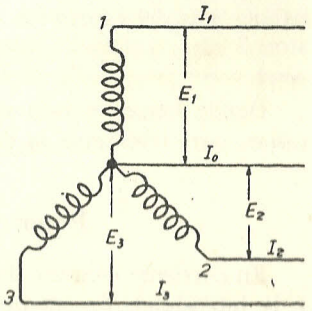

Fig. 30. — Conexión en estrella de un sistema trifásico.

de 120°, puesto que cuando el conductor 1, por ejemplo, corta perpendicularmente a las líneas, se tiene en él la tensión máxima, pero en ese instante no sucede lo mismo en las otras dos. Representando las tres tensiones en un mismo

gráfico, obtendremos la figura 29. Tal sistema se llama: *trifasico*, y con él se pueden formar tres circuitos, en la forma que veremos.

Por lo pronto, los tres conductores de la figura 28, serán en la realidad bobinados completos en el alternador, y se pueden conectar en dos formas distintas. Una es la conexión en *estrella* y la otra en *triángulo*. La conexión en estrella se ve en la figura 30. Un extremo de cada bobinado se une con los otros en un punto común llamado *neutro*, que forma un borne de la red. Los otros extremos forman los otros tres bornes vivos. El neutro se suele conectar a tierra pues tiene potencial cero.

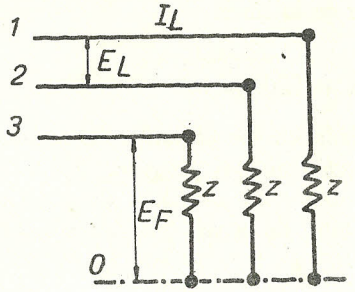

Fig. 31. — Forma de conectar las cargas o consumos en estrella.

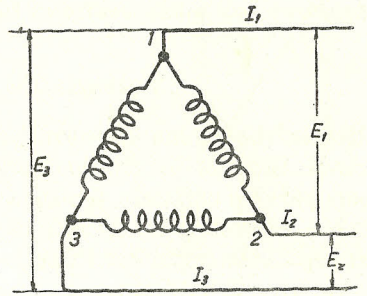

Fig. 32. — Conexiones en triángulo de un sistema trifásico.

Entre los puntos 1, 2 ó 3 y el punto neutro *O*, se tiene la tensión llamada de fase, y que se indica en la figura con E_1, E_2 o E_3 que son iguales entre sí. La figura 31 muestra cómo se conecta a la red el circuito de consumo, constituído por impedancias cualesquiera, repartidas en las tres fases. Entre los puntos o hilos 1 y 2 ó entre el 2 y 3 ó entre el 3 y 1, hay una tensión mayor que la de fase, de valor:

$$E_L = 1{,}73\ E_F$$

Llamada *tensión de línea*, y que se calcula multiplicando la de fase por 1,73. Por ejemplo, en las redes de 220 V. de fase, la tensión de línea es de 380 V. aproximadamente.

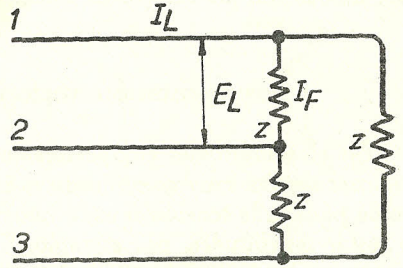

Fig. 33. — Forma de conectar las cargas o consumos en triángulo.

El otro sistema de conexión se llama en triángulo, y se muestra en la figura 32. Consiste en conectar las tres bobinas del alternador en serie entre sí, y tomar la conexión de los bornes de la red en los puntos de unión entre ellas. Aquí la tensión de fase es la misma que hay entre las líneas, de modo que no hay tensiones diferentes como en la red estrella. Pero si observamos el circuito de carga, que se ve en la figura 33, vemos en seguida que en la línea hay mayor corriente que en cada fase. En efecto, al hilo N° 1 concurren las corrientes de dos ramas, y lo mismo sucede con los otros dos hilos. Se deben sumar dos

corrientes de fase para tener la corriente de línea, pero aclaremos que tal suma debe ser vectorial, por tratarse de corrientes que no están en fase entre sí. Haciendo cálculos se llega a que la corriente de línea está dada por la siguiente fórmula:

$$I_L = 1{,}73\ I_F$$

Es decir, multiplicando la corriente de fase por 1,73. Los tres circuitos de carga están constituídos por impedancias, como si fueran tres circuitos monofásicos independientes, y a los efectos de los cálculos, se puede proceder así, tomando cada uno por separado. Nótese que en las redes o circuitos en triángulo no hay punto neutro ni hilo neutro en la línea.

Potencia de sistemas trifásicos

Hemos visto cómo se calculaba la potencia en los circuitos de corriente alternada, monofásicos. No hay ningún inconveniente en proceder de idéntica manera para los trifásicos, tomando cada uno de los tres circuitos por separado. Pero hay una forma de calcular la potencia total de la red trifásica sin considerar separadamente a cada fase.

Para ello, se toman las tensiones y las corrientes de línea, que si la red tiene sus cargas equilibradas, bastará tomar la tensión entre dos líneas y la corriente que pasa por una línea, pues los demás valores serán iguales. Luego se determinará el defasaje entre esa corriente y esa tensión, y se calculará por coseno de ese ángulo. Con esos valores se utiliza la fórmula que da la potencia total trifásica:

$$W = 1{,}73\ E\ I \cos \varphi$$

Recordando que la tensión se toma en Volt, y la intensidad en Amper, y que ambas son los valores de línea. La potencia W resulta en Watt.

Representación vectorial de magnitudes alternadas

En el estudio del comportamiento de los circuitos sometidos a tensiones alternas resulta muy complicado el procedimiento gráfico de dibujar una sinusoide para cada tensión o cada intensidad, cosa que sería necesaria para sumar o restar magnitudes, por ejemplo. En corriente continua, la suma de dos tensiones se hacía mediante una operación aritmética de adición, cuidando el signo, o sea la polaridad. A lo sumo podemos hablar de suma algebraica, pero siempre las tensiones y las corrientes estaban en fase, si es que se puede hablar de fases en continua. En alternada, es común que entre las tensiones o entre las corrientes, o entre tensión y corriente haya un defasaje angular. En efecto, hemos visto que la inclusión en los circuitos de elementos como las bobinas y los capacitores provocaban atrasos y adelantos de la corriente con respecto a la tensión, y que esos defasamientos angulares intervenían en las expresiones que rigen las leyes fundamentales de los circuitos; por ejemplo, en la expresión

de la potencia aparece el coseno del ángulo que hay entre la corriente y la tensión.

De acuerdo con la teoría matemática, podemos reemplazar a cada sinusoide por un vector, y las operaciones con vectores se hacen según las leyes geométricas. Pongamos un ejemplo, representado en la figura 34, en el cual hay un circuito con tres ramas, cada una de las cuales está recorrida por corriente alternada, y se desea conocer gráficamente la corriente total.

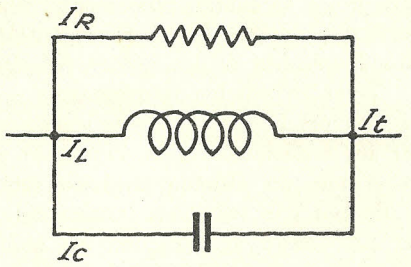

Fig. 34. — Un circuito de corriente alternada con tres ramas de distintas corrientes que se suman vectorialmente.

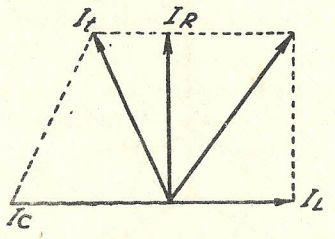

Fig. 35. — Forma como se suman vectorialmente corrientes alternadas.

Sabemos que la corriente en la resistencia está en fase con la tensión en los bornes de ésta, porque no hay nada que provoque un atraso o un adelanto. Entonces tomamos un vector vertical, que será el de referencia para los ángulos de fase, y cuya medida sea proporcional a la magnitud de la corriente I_R (fig. 35). La corriente en la bobina atrasa 90° con respecto a la tensión, o sea con respecto a la corriente en la resistencia, con lo que el vector que la representa tendrá una medida proporcional al valor de esa corriente y se dibujará horizontal y hacia la derecha. Por convención práctica, los adelantos se marcan

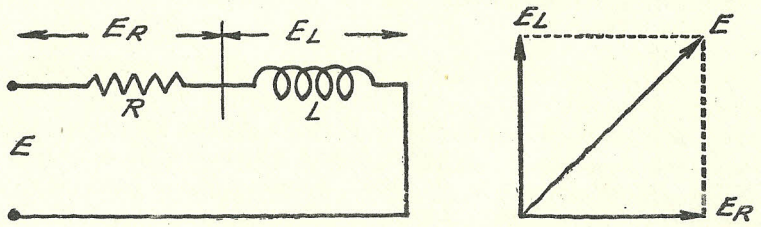

Fig. 36. — Representación vectorial de tensiones alternas.

en sentido contrario a la marcha del reloj y los atrasos en el sentido de ella. Luego, la corriente en el capacitor adelanta con respecto a la corriente en la resistencia, y con la medida que corresponde trazamos el vector horizontal hacia la izquierda.

Ahora no hay más que sumar vectores. Se los toma de a dos, por ejemplo, primero los I_R e I_L, trazando por sus extremos paralelas al otro vector, resultando la recta inclinada hacia la derecha que es la suma de esas dos corrientes.

Sumando ésta con la I_c por el mismo procedimiento obtenemos I_t que es la corriente total del circuito, en magnitud proporcional a la medida del vector resultante.

A título ilustrativo mostramos en la figura 36 otro caso de suma de vectores, que en este caso son dos tensiones alternas, una la que se produce como caída en el resistor R y la otra la que hay entre los bornes de la bobina, y que coincide con la f.e.m. de autoinducción en ella. Los dos vectores se toman formando un angulo de 90° pues el segundo atrasa ese ángulo con respecto al primero, y se suman por el procedimiento gráfico conocido. La resultante es la tensión E que hay en los bornes del circuito.

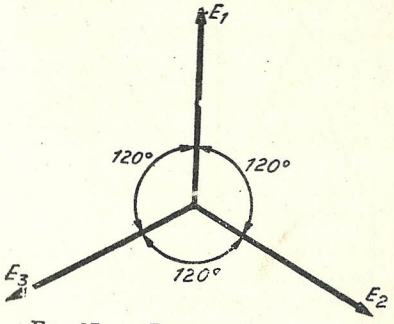

Fig. 37. — Representación de un sistema trifásico por vectores.

También pueden representarse en forma vectorial sistemas de tensiones, como ser los trifásicos. En la figura 37 puede verse que un sistema trifásico está formado por tres tensiones iguales defasadas de 120° entre sí, tal como lo habíamos definido anteriormente. Los diagramas vectoriales son de suma utilidad para resolver e interpretar gráficamente las relaciones entre las magnitudes alternas; en el estudio de las máquinas eléctricas de corriente alternada veremos algunos casos prácticos y comprobaremos su comodidad.

Corrientes de Foucault

Toda vez que una masa metálica está sometida a un campo magnético alternado se producen fenómenos que debemos conocer, pues en las máquinas eléctricas ocurre sistemáticamente.

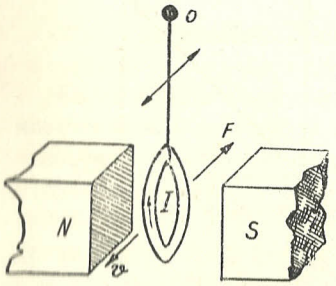

Fig. 38. — Forma en que se producen las corrientes parásitas o de Foucault.

Supongamos un anillo conductor suspendido desde un punto O (ver fig. 38), dentro del campo magnético de un imán. Hagamos oscilar al anillo dentro del campo, de modo que se mueva perpendicularmente a las líneas de fuerza. Sabemos que se inducirá en él una f.e.m. y, como tiene un circuito eléctrico cerrado, circulará una corriente eléctrica.

Pero ahora tenemos una corriente circulando por un conductor, que está sumergido en un campo magnético: sabemos que esto da origen a una fuerza que tiende a desplazar al conductor. Veamos cuáles son los sentidos correspondientes.

Consideremos el caso de que el anillo se esté moviendo con velocidad v, en dirección saliente del papel. Aplicamos la regla de la mano derecha para

determinar el sentido de la corriente inducida, y vemos que la misma es ascendente en la parte delantera del anillo, como se indica en la figura.

Entre esa corriente y el campo magnético se origina una fuerza, cuyo sentido se encuentra con la regla de la mano izquierda. La aplicamos, y vemos que la fuerza se dirige hacia dentro del papel. Como el anillo tenía movimiento en dirección contraria, será frenado y cesará todo el fenómeno.

Esto lo contempla la ley de Lenz, que dice que la f.e.m. inducida tiende siempre a oponerse a la causa que la genera. En nuestro caso, la causa es el movimiento del anillo, pues merced a él se inducía la corriente, y ésta tiende a anular el movimiento.

Las corrientes inducidas en las masas metálicas en movimiento, que forman circuitos eléctricos cerrados, se denominan: "*corrientes de Foucault o parásitas*" y representan siempre una pérdida de energía en las máquinas eléctricas. Para que se produzcan corrientes parásitas no es necesario que se muevan las masas metálicas, sino que basta que éstas sean cortadas por un flujo magnético, y esto sucede siempre que hay un flujo variable. Y como un bobinado recorrido por corriente alterna produce un flujo alternado (fig. 39), se producirán corrientes parásitas en el núcleo.

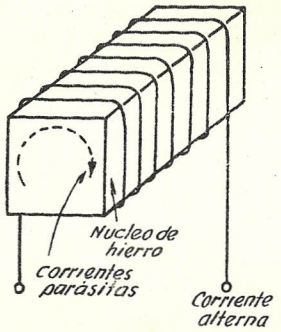

Fig. 39. — El campo magnético producido por una corriente alterna origina corrientes parásitas en el núcleo de hierro.

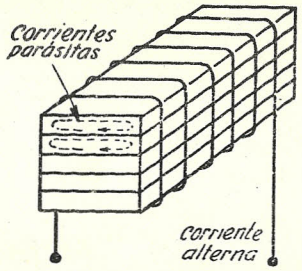

Fig. 40. — Haciendo el núcleo con una pila de chapas se reduce la magnitud de las corrientes parásitas.

Para reducir las corrientes de Foucault, se pueden emplear metales de alta resistividad, si el funcionamiento del dispositivo lo permite, o aumentar la resistencia al recorrido de tales corrientes; esto último se consigue haciendo los núcleos de hierro, sometidos a campos magnéticos variables, con chapas delgadas yuxtapuestas (fig. 40).

Las pérdidas por corrientes de Foucault se expresan por la potencia eléctrica que absorbe un Kg de núcleo de hierro, formado por varias chapas de

espesor *e*, cuando la inducción máxima del campo magnético es B y la cantidad de variaciones completas por segundo es f. Se tiene:

$$W = \frac{2{,}2\, f^2\, B^2\, e^2}{10^{11}}$$

en cuya expresión se toma el espesor de las chapas en mm, resultando la potencia por Kg en Watt. Hacemos notar que f representa, en corriente alternada, directamente la frecuencia. La fórmula anterior habla de la conveniencia de reducir en lo posible el espesor de las chapas del núcleo, las que, como es evidente, deben estar aisladas eléctricamente entre sí

PARTE SEGUNDA

FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA - MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA - GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA - MOTORES SÍNCRÓNICOS - MOTORES ASINCRÓNICOS TRIFÀSICOS - MOTORES ASINCRÓNICOS MONOFÁSICOS - MOTORES UNIVERSALES Y DE REPULSIÓN.

CAPÍTULO III

GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA

La importancia adquirida por las máquinas eléctricas, ya sean generadoras de energía o motores para aprovecharla, escapa a toda descripción. En realidad, las máquinas eléctricas son transformadores de energía, pues resultando más cómodo el manejo de los motores accionados por la electricidad, se transforma la energía mecánica en eléctrica, en los generadores; se transporta la corriente hasta el lugar de utilización y allí se la convierte nuevamente en energía mecánica.

Además de la impulsión de las máquinas de las fábricas y talleres, la corriente eléctrica generada se utiliza para la iluminación, para la calefacción, para ciertos trabajos químicos y para una interminable serie de efectos que contribuyen al confort moderno.

Es pues, desde todo punto de vista, sumamente interesante, el conocimiento completo del funcionamiento, manejo y reparación de tan prácticos dispositivos por parte del montador electricista, pues no se concibe actividad industrial en la que no entre en juego algún generador o motor eléctrico. Siempre hará falta alguien que lo instale, que lo atienda, que lo repare o que le cambie alguna de sus características para adaptarlo a nuevas necesidades.

Dedicamos esta publicación a la parte vital de la máquina, su arrollamiento, en el que se recoge la corriente producida en los generadores, o al cual se debe aplicar corriente para que se produzca el efecto mecánico útil, en los motores. Los bobinajes son motivo de frecuente atención por parte de los electricistas, ya sea para renovarlos por deterioros, o para modificarlos por desearse distintas características de funcionamiento.

Es imposible, entonces, ignorar los rudimentos sobre el cálculo de devanados, la aplicabilidad de los distintos tipos, la forma correcta de realizarlos y la interpretación de los que están hechos, para su modificación posterior. Dado el carácter eminentemente práctico de este tratado, se omitirán los

desarrollos matemáticos y la aplicación más o menos compleja de las leyes de la Electrotecnia, tratando así de evitar dificultades de interpretación al lector que sólo busca detalles sobre la forma de construir bobinados. Son necesarios, sin embargo ,algunos conceptos generales sobre el funcionamiento de las máquinas eléctricas, así como una descripción de las distintas partes de las mismas, a los efectos de ordenar la exposición y uniformar la terminología bastante anárquica por cierto.

Limitaremos este capítulo a una somera revisión de los elementos constituyentes de un generador eléctrico de *corriente continua*, dejando la descripción referente a las máquinas de *corriente alternada* para un próximo capítulo. Esta ordenación está impuesta por razones cronológicas y no técnicas, puesto que como se verá en su oportunidad, antes de recoger corriente continua en los generadores, se produce corriente alternada, que fué deshechada al principio por ser considerada inconveniente.

Principio de funcionamiento de generadores de corriente continua

Si suponemos ubicada una espira dentro de un campo magnético como lo demuestra la figura 41, y la hacemos girar con una velocidad uniforme, los dos lados de la misma cortan líneas de fuerza del campo, induciéndose una

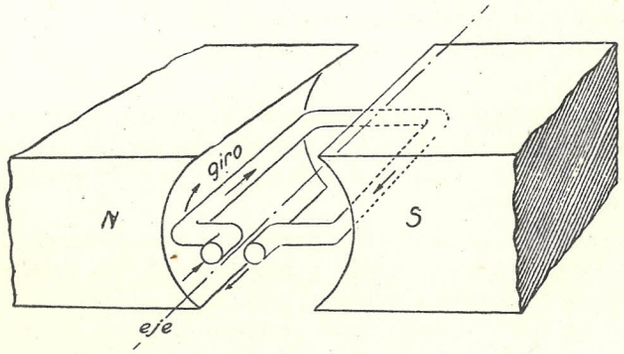

FIG. 41. — Principio elemental del generador eléctrico.

fuerza electromotriz. Esto ya lo vimos someramente en la fig. 21, pero conviene insistir detalladamente.

De acuerdo con las leyes de Faraday y Lenz, cuando un conductor corta perpendicularmente las líneas de fuerza de un campo magnético, el valor de la fuerza electromotriz inducida está dada por la siguiente expresión:

$$e = \frac{\triangle \Phi \, 10^{-8}}{\triangle t}$$

es decir, que será directamente proporcional al flujo magnético cortado e inversamente proporcional al tiempo empleado en cortarlo.

El factor 10^{-8} está para dar el resultado en Volt. En el caso de la figura. el movimiento no se realiza perpendicularmente a las líneas de fuerza más que en dos posiciones, la que aparece dibujada y la próxima media vuelta más tarde. Para todas las demás posiciones de al espira la dirección del movimiento y las de las líneas de fuerza forman un ángulo α. Consideremos algunas posiciones intermedias, tal como se ve en la figura 42; se han dibujado 12 posiciones de las infinitas posibles para uno de los lados de la espira; en cada posición la dirección del movimiento forma con las líneas de fuerza los siguientes ángulos:

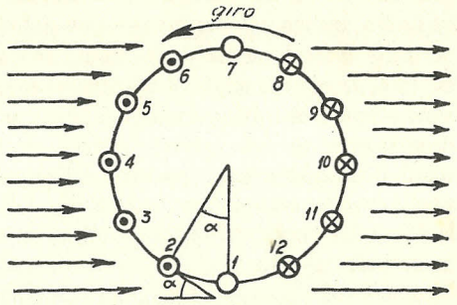

FIG. 42. — Posiciones sucesivas que ocupa la espira en una vuelta completa.

Posición	α	Posición	α
Nº 1	0°	Nº 7	0°
Nº 2	30°	Nº 8	30°
Nº 3	60°	Nº 9	60°
Nº 4	90°	Nº 10	90°
Nº 5	60°	Nº 11	60°
Nº 6	30°	Nº 12	30°

De modo que se puede calcular el valor de la f.e.m. inducida para cada una de dichas posiciones. En efecto, la expresión de Faraday para movimientos oblicuos es la siguiente:

$$e = \frac{\triangle \Phi \operatorname{sen} \alpha}{\triangle t \, 10^{8}}$$

es decir, idéntica que para la dada en el movimiento perpendicular del conductor pero afectada por el factor seno del ángulo alfa; luego si suponemos constante al flujo y al tiempo que tarda el conductor en recorrer cada tramo de su vuelta, ambas cosas factibles (el imán da un campo constante y el conductor gira a velocidad constante), la expresión anterior puede ser simplificada, agrupando los términos invariables en la letra *E* y se tiene:

$$e = E \operatorname{sen} \alpha$$

De manera que la f.e.m. está dada por una cantidad constante multiplicada por el seno de un ángulo que corresponde a cada posición del conductor.

Esto en cuanto al valor de la f.e.m.i.; veamos el sentido o signo de la misma. Para determinarlo volvamos a la figura 42 y apliquemos la regla de Faraday o regla de la mano derecha, ya conocida por nosotros (fig. 18).

Para cualquiera de las posiciones de 1 a 7, dicha regla se aplica así: la palma de la mano recibirá de frente a las líneas de fuerza, el pulgar indica

la dirección del movimiento, es decir, hacia abajo; los demás dedos señalan hacia afuera del papel; éste es el sentido de la fuerza electromotriz durante esta media vuelta. Luego en el circuito que representa el conductor en esa posición indicamos un punto que señala sentido saliente.

Para la otra media vuelta, o sea la que comienza en la posición 7 y termina en la 1, la misma regla de la mano derecha nos dice que la palma debe estar vuelta hacia el mismo lado que antes, pero el pulgar indicador del sentido de desplazamiento debe señalar hacia arriba; resulta así que los demás dedos quedan dirigidos hacia adentro del papel, revelando que la f.e.m. durante esta media vuelta será entrante, es decir, el sentido contrario al que teníamos en la 1ª media vuelta. Indicamos con un punto la corriente saliente y con una cruz la entrante al papel.

Luego si suponemos positiva la f.e.m. en la 1ª media vuelta, en la 2ª resultará negativa. Tenemos entonces que además de tener valores variables con el ángulo, dicha f.e.m. invierte su signo dos veces por vuelta.

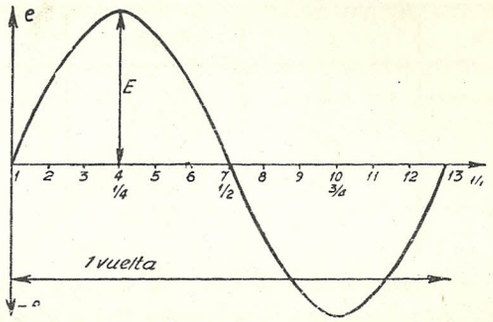

FIG. 43. — Representación gráfica de la f.e.m. inducida en la espira girante.

Podemos ahora hacer una representación gráfica de los sucesivos valores que toma la f.e.m.; para ello tomamos un eje horizontal (ver fig. 43) y marquemos las posiciones 1 a 12 indicando con el número 13 la posición uno después de una vuelta. Hacia arriba del eje tomamos los valores positivos y hacia abajo los valores negativos. Es evidente que la f.e.m. varía siguiendo una ley sinusoidal.

Las indicaciones precedentes nos llevan a afirmar que la f.e.m. inducida en cada espira de una máquina de corriente continua es alternada; el problema consiste en *enderezarla* para disponer de una f.e.m. continua. Este es el objeto del *conmutador o colector.*

Distinguiremos al motor del generador, a pesar de que están construídos en forma similar, porque mientras al primero se lo debe conectar a la red de canalización de energía eléctrica, el segundo debe ser impulsado por un motor térmico o de otra clase, recogiéndose en sus bornes la energía con que se alimentará la red.

Colector o conmutador

Si disponemos que la toma de corriente no se haga directamente de los extremos del conductor que forma la espira, sino que fijamos al rotor girante dos sectores metálicos (de cobre), indicados (a) y (b) en la figura 44, de modo que los dos sectores giren junto con el conductor y colocamos dos trozos fijos de bronce duro o carbón, de manera que rocen con los sectores metálicos a y b, pero que no giren con ellos sino que permanezcan en una posición fija durante el giro completo del conductor con sus sectores metálicos, éstos rozarán continuamente con los trozos de material bronce o carbón pudiendo salir por ellos la corriente de la espira hacia el circuito exterior. Las piezas de carbón se llaman "escobillas" y aparecen negras en la fig. 44.

Observemos que durante la media vuelta en que la corriente es entrante en el conductor de la izquierda, el sector *a* toca la escobilla de la izquierda,

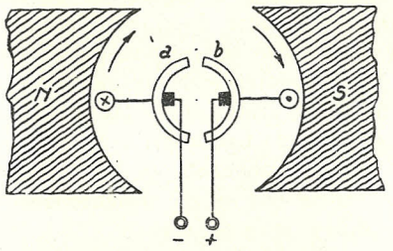

FIG. 44. — Acción del conmutador o colector.

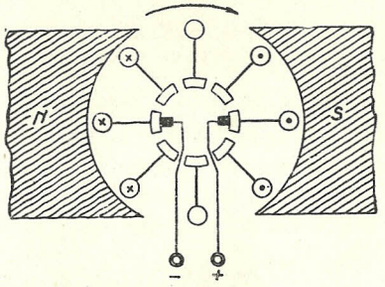

FIG. 45. — Colector de múltiples escobillas.

y cuando cambia de signo, por pasar hacia la mitad derecha de su giro, toca la escobilla de la derecha. Con el conductor de la derecha pasa algo parecido: durante su media vuelta en la posición derecha, la corriente es saliente y el sector *b* toca la escobilla de la derecha, pero en cuanto pasa a la izquierda, la corriente cambia de sentido de circulación, pero también cambia de escobilla el sector *b*, pues comienza a rozar la escobilla de la izquierda.

De modo que, resumiendo, tenemos que en la escobilla de la derecha siempre fluye corriente y en la de la izquierda siempre entra, y esto durante todo el giro del conductor, con lo que se ha eliminado el inconveniente citado más arriba.

No hay ninguna dificultad en extender el problema a varios conductores, cada uno de los cuales forme una espira girante. Observemos para ello la figura 45, y veremos que la solución está en disponer tantos sectores metálicos como lados de espira haya, y aislar todos los sectores entre sí, disponiendo igual que antes un par de escobillas para recoger la corriente producida durante el giro de los conductores.

Posteriormente se verá que no siempre es necesario que haya igual cantidad de sectores en el colector como conductores inducidos, y que, a veces, no hay

sólo dos escobillas, o si las hay pueden estar colocadas en posición distinta que la diametral opuesta.

Hemos conseguido evitar el cambio de polaridad en los bornes de la máquina pero todavía tenemos la variación de la f.e.m. Luego si construimos un generador de corriente continua con una sola espira, la representación gráfica de la f.e.m. sería como se ve en la figura 46. Esto habla de la imposibilidad de construir máquinas de una sola espira porque carecería de valor práctico.

Si en cambio se distribuyen regularmente alrededor del eje una gran cantidad de espiras, cada una de las cuales las unimos a un sector del colector, sucederá que la f.e.m. en todas ellas no estará en fase, es decir, sus valores máximos no se producirán en el mismo instante, puesto que en un momento determinado ocupan la posición diametral horizontal de la figura 42. En esa espira se produce f.e.m. máxima, un poco más tarde otra espira ocupa esa posición y tendrá el máximo de su f.e.m. y así sucesivamente van desfilando una a una todas las espiras. Luego si representáramos gráficamente las ff.ee.mm. en todas las espiras se tendría la serie de curvas de la figura 47.

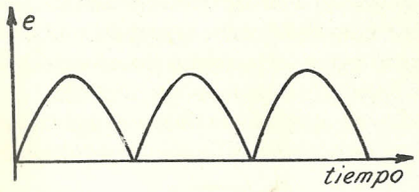

FIG. 46. — F.e.m. resultante cuando sólo hay dos delgas en el colector.

Colocando las escobillas de modo que apoyen solamente en los sectores o *delgas* del colector que estén unidas a las espiras que en ese instante tienen

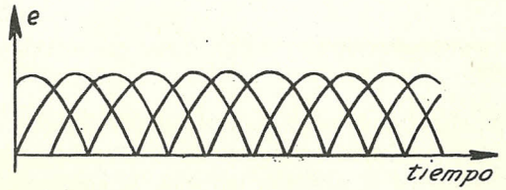

FIG. 47. — Efecto del aumento del número de delgas del colector.

su f.e.m. máxima durante toda la vuelta, tendremos presente en los bornes de la máquina una f.e.m. prácticamente constante, según se verá oportunamente.

Escobillas

Su nombre deriva de la construcción original, pues estaban formadas por un conjunto de pequeños alambres formando un haz compacto. Posteriormente, se comprobó que se obtenía mejor resultado utilizando carbón prensado, con lo que se aumentaba la duración. El desgaste que sufren durante el roce continuo contra el colector es muy grande, por lo que deben ser fabricadas con grafito seleccionado, conglomerado a veces con partículas de cobre o bronce.

La designación comercial de las escobillas, además de referirse a la clase de material de que está fabricada, comprende sus dimensiones, que se indican

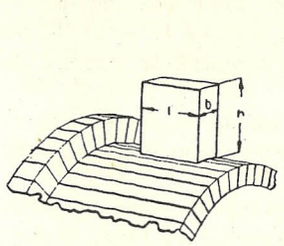

FIG. 48. — Dimensiones normales de las escobillas.

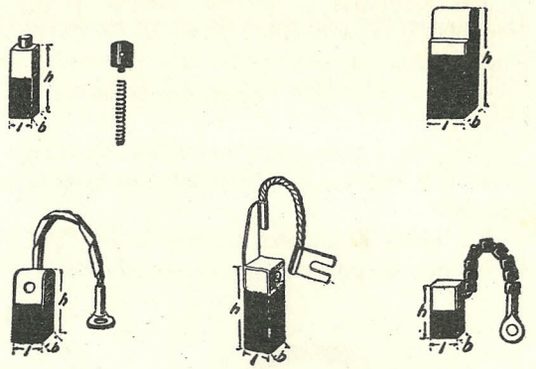

FIG. 49. — Tipos comunes de escobillas.

en la figura 48 y que son: largo (l), en el sentido del eje de la máquina, ancho (b) en sentido transversal y alto (h) en el sentido diametral del colector. Todas las medidas se indican en milímetros, como se ve en la fig. 49.

Características de escobillas comunes

Material de la escobilla	Densidad de corriente admisible Amper./cm2.	Tensiones de utilización Volt
Carbón blando	8 a 10	110
„ semiduro	5 a 7	220
„ duro	3 a 4	440
„ cobreado	15 a 20	opcional
„ cobreado con gran proporción de grafito.....	10 a 15	„
Cobre trenzado.....	25 a 30	baja tensión
Latón	20 a 25	„ „

La figura 49 ilustra algunos de los tipos comunes de escobillas que se encuentran en el comercio, siendo la parte negra el grafito metalizado sin recubrimiento, y la parte blanca es el mismo material, pero al que se le ha dado un baño de cobre. Como se ve, algunos modelos están provistos de un chicote para su conexión a los bornes de la máquina.

El primer modelo ilustrado corresponde al de las máquinas pequeñas, pudiendo verse junto a él el resorte que presionará la escobilla contra el colector y la tapa de sujeción.

Porta-escobillas

Las escobillas se colocan dentro de piezas especiales llamadas "porta-escobillas", cuya cavidad tiene la forma conveniente para que aquellas no tengan juego en su interior. Un resorte se encarga de que la escobilla sea presionada sobre las delgas del colector, a fin de asegurar la bondad del contacto.

Los dos o más porta-escobillas que tenga la máquina se aseguran a un collar con brazos, a veces mediante bridas, y otras veces mediante soportes especiales.

La figura 50 muestra algunos de los tipos más comunes de porta-escobillas, en los que se puede ver el brazo elástico con su resorte para hacer presión

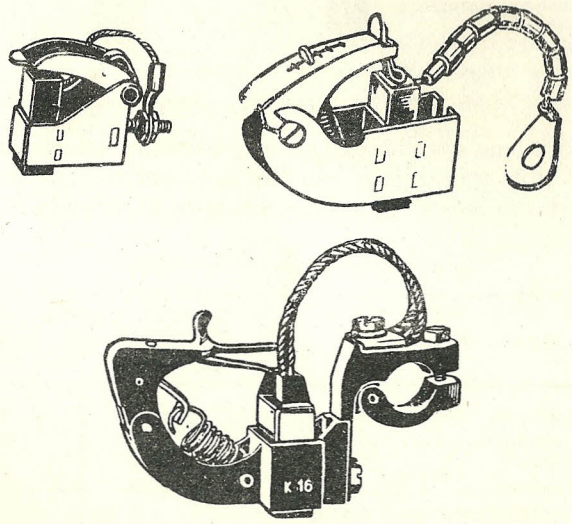

FIG. 50. — Tipos corrientes de portaescobillas.

sobre la escobilla, la escobilla misma colocada y el chicote de conexión que se une con un conductor al borne de la máquina. La escobilla y todas las partes metálicas que quedan unidas a ella, deben estar aisladas de la masa metálica de la máquina, por lo que se disponen piezas aislantes a tal efecto.

Valor de la f.e.m. inducida

Hemos dicho que el valor de la f.e.m. inducida en un solo conductor era directamente proporcional al flujo cortado e inversamente proporcional al tiempo empleado en cortarlo. Y, de acuerdo con la ley de Lenz y Faraday, escribimos:

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} 10^{-8}$$

Pero si hay N conductores activos en el bobinado del rotor, la f.e.m. será N veces mayor, teóricamente. Además, se puede calcular cuánto valdrá el flujo cortado y el tiempo empleado en esa operación.

En efecto, si el rotor da n revoluciones por minuto, en una vuelta empleará un tiempo:

$$\Delta t = \frac{60}{n} \text{ segundos}$$

Y si llamamos Φ al flujo por polo del inductor, y hay p polos, se puede afirmar que en una vuelta el flujo cortado por cada conductor será:

$$\Delta \Phi = p \Phi$$

Con lo que la expresión de la f.e.m. en todo el bobinado resulta:

$$E = \frac{p \Phi N 10^{-8}}{\frac{60}{n}} = \frac{p \Phi n N 10^{-8}}{60}$$

Pero se supone con esto que todos los conductores del bobinado están en serie, y en la práctica la máxima cantidad en serie, como veremos más adelante, es la mitad del total, o menos. Generalmente el bobinado está dividido en un cierto número de ramas en paralelo, con lo que, si la cantidad de ramas en paralelo se llama:

$$a = \text{N° de ramas en paralelo}$$

se tendrá que la f.e.m. inducida total será "a" veces menor, es decir, tendrá un valor:

$$E = \frac{p \Phi N n 10^{-8}}{60 a}$$

Y ello es evidente, pues si se compara el problema con un acoplamiento de pilas, por ejemplo, 10 pilas en paralelo dan una f.e.m. resultante igual a la de una sola pila. En cambio, conectándolas en serie se tiene la suma de sus respectivas ff.ee.mm. Esto hace pensar en que es inconveniente conectar ramas en paralelo en el bobinado, porque se reduce la f.e.m. total, pero en cambio, se obtiene mayor corriente, ya que la intensidad total que el generador suministra a la red es la suma de las corrientes de todas las ramas en paralelo. Más adelante tendremos ocasión de volver sobre esto.

El circuito magnético

Hemos visto que los conductores activos de las máquinas eléctricas deben moverse dentro de un campo magnético, para que corten líneas de fuerza. Si bien teóricamente puede suponerse que tal campo lo suministra un imán permanente, en la práctica no es posible obtener rendimientos importantes si no se emplean electroimanes con núcleo de hierro, a fin de aumentar la densidad magnética.

En la figura 51 se representa esquemáticamente una máquina eléctrica con sus dos bornes *a b* unidos a las dos escobillas del colector. El eje, el colector y el núcleo del devanado donde se recoge la corriente generada forman en conjunto el *rotor* o *inducido;* el resto de la máquina lo forma el circuito inductor que abarca la carcasa y las masas polares. Estas masas polares son los núcleos del electroimán que produce el campo magnético necesario; para tal fin llevan un bobinado cuyos bornes son *c* y *d*. Este bobinado debe estar recorrido por una corriente eléctrica para que se produzca el flujo magnético ya mencionado. Para tal fin podríamos utilizar una fuente independiente externa o la misma corriente generada en el inducido. Puede, entonces, clasificarse el sistema de excitación en dos grandes grupos: *excitación independiente* y *autoexcitación*, que veremos más adelante en detalle.

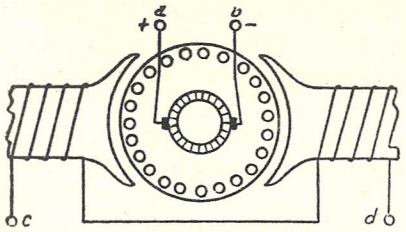

FIG. 51. — Separación de la máquina en sus dos circuitos: eléctrico y magnético.

Las masas polares que se ven en las figuras 51 y 44 son, en realidad, los núcleos de hierro de los electroimanes mencionados, que se disponen a

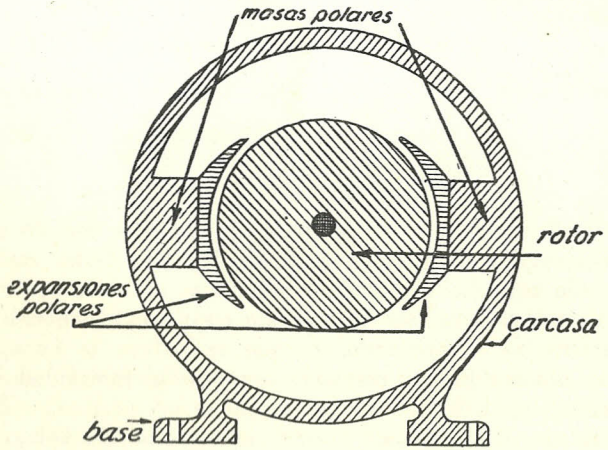

FIG. 52. — Circuito magnético de una máquina bipolar.

los costados del rotor que tiene los conductores activos. Para mantener la densidad magnética que hay a la salida de las masas polares, el rotor debe ser también de hierro, de modo que las líneas de fuerza sigan su recorrido por él, hasta llegar a la masa polar opuesta.

La figura 52 ilustra sobre la disposición de las distintas partes de hierro de la máquina, pudiendo verse que las dos masas polares están fijas a una carcasa exterior, de la que pueden formar parte si ambas son fundidas.

Para que el campo magnético abarque el mayor número posible de

conductores del rotor, se colocan en los extremos de las masas polares piezas de hierro, de la forma que se puede ver en la figura, y que se denominan *expansiones polares*. En realidad, el ancho de las mismas está limitado, porque se debe mantener una densidad magnética fijada para el funcionamiento óptimo de la máquina.

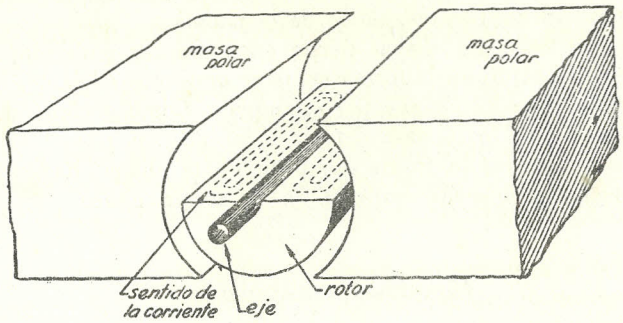

FIG. 53. — Corrientes parásitas inducidas en la masa de hierro del rotor.

La carcasa, las masas polares y las expansiones polares, forman en conjunto lo que se denomina generalmente "estator", siendo la parte inmóvil de la máquina, que se asegura a la fundación con bulones que pasan por orificios que hay en la base. En el estator se encuentra siempre la caja de bornes, el collar de escobillas y las dos tapas extremas, con los cojinetes para el rotor, que es la parte móvil de la máquina.

El rotor debe ser de hierro, por la razón expuesta más arriba, pero además, como se mueve dentro del campo magnético de la máquina, se inducirán en la masa metálica del mismo corrientes parásitas, que ocasionarían elevación de temperatura, por lo que se construye laminado en vez de macizo. Las chapas deben estar colocadas en el sentido del recorrido de las líneas del campo, es decir, radiales con respecto al eje.

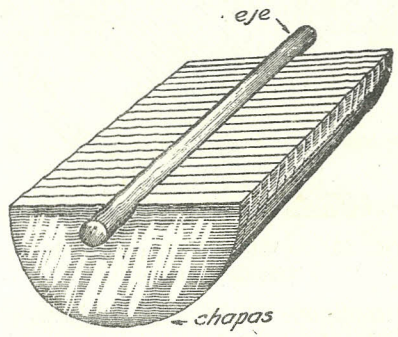

FIG. 54. — Colocación de las chapas de hierro en el rotor

Para aclarar esto, veamos la figura 53, que muestra el corte de un rotor macizo, dentro del campo magnético de las masas polares. Al girar, la parte exterior del rotor tiene más velocidad que la parte interna, cercana al eje, con lo que se ocasionan diferencias de potencial magnético que producirán corrientes inducidas en la masa del rotor.

No se puede evitar la inducción de corrientes parásitas en la masa del rotor, pero sí reducir su magnitud, aumentando la resistencia a su circulación. Para ello, veamos la figura 54. Si se colocan una serie de chapas de hierro

delgadas, aisladas entre sí, la corriente inducida encontrará en su camino una resistencia mucho mayor, y su magnitud será limitada a valores aceptables. Las chapas se aislan eléctricamente entre sí mediante papel de seda, esmalte, o, simplemente, oxidándolas con un chorro de vapor de agua.

El paquete de chapas se asegura mediante pernos roscados, apretándolas bien a fin de no disminuir sensiblemente la sección neta del hierro, que es la que interesa para el circuito magnético de la máquina.

Los bordes de todas las chapas tienen unas ranuras para alojar los conductores activos del rotor, en la forma como se verá más adelante. Estas ranuras se hacen al fabricar las chapas, por estampado. Como además, deben llevar una perforación central para paso del eje y los gujeros para los bulones, se estampa de una sola vez la forma completa de la chapa, haciéndolas todas iguales y uniéndolas después entre sí en la forma citada.

Máquinas tetrapolares

La máquina de la figura 52 tiene dos masas polares, y se denomina entonces "máquina bipolar".

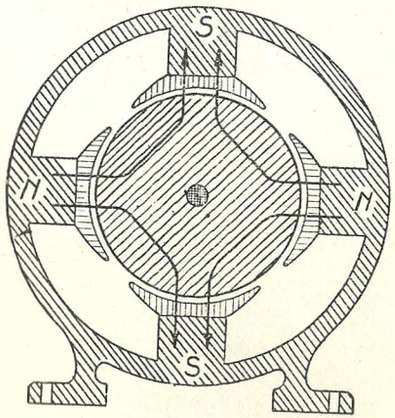

Fig. 55. — Circuito magnético de una máquina tetrapolar.

En la práctica se construyen, además, generadores y motores de más de dos polos, con cuatro, por ejemplo. Las diferencias que esto produce en el circuito eléctrico serán tratadas en su oportunidad, pero las diferencias en el circuito magnético son fundamentales.

La figura 55 muestra un corte esquemático de una máquina tetrapolar, que tendrá, por consiguiente, cuatro masas polares, cada una con su respectiva expansión polar. La carcasa es similar a las máquinas de dos polos, salvo en el detalle interno del mayor número de salientes.

Las masas polares tienen la polaridad indicada en la figura, es decir, están enfrentados los polos del mismo signo y contiguos los de signo contrario, a los efectos de obtener un recorrido normal de las líneas de fuerza, concentrado en lo posible en la periferia del rotor, que es donde están ubicados los conductores activos.

La ventaja de esta máquina salta a la vista, si se observa el recorrido de las líneas de fuerza en la figura 55, puesto que ellas se concentran principalmente en la periferia del rotor, que es precisamente donde se colocan los conductores activos. El hecho de tener cuatro polos no implica expresamente que deba tener cuatro escobillas; pues veremos que pueden tener solamente dos.

En forma similar se diseñan máquinas multipolares, con más de cuatro

polos, pero teniendo siempre un número par, y dispuestos simétricamente a lo largo de la carcasa. En la práctica, abundan más las máquinas de dos y cuatro polos que las de mayor número, por lo que dedicaremos la mayor atención a aquéllas.

CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE GENERADORES

Hemos visto que de acuerdo a la forma de alimentar el circuito inductor, es decir a los electroimanes encargados de producir el campo magnético, se podía clasificar a las máquinas de corriente continua en dos grandes grupos: con excitación independiente y autoexcitadas. A su vez, estas últimas se subdividen en máquinas excitadas en derivación o paralelo, en serie y en mixta o compound.

Veremos en detalle estas diversas formas de conexión y los efectos que ellas producen en el funcionamiento de los generadores de corriente continua, para pasar más adelante a ocuparnos de los motores de corriente continua.

Máquinas con excitación independiente

El bobinado del inductor se alimenta con una batería de acumuladores o un generador de reducida potencia. Prácticamente ese circuito absorbe del 1 % al 5 % de la potencia de un generador principal. La figura 56 muestra el esquema y en él se ven los bornes *a* y *b* del inducido o bornes externos de la máquina que se conectarán al circuito de distribución.

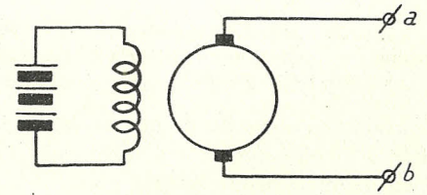

Fig. 56. — Esquema eléctrico de una máquina con excitación independiente.

El circuito inductor incluye una batería, suponiendo que esa fuera la fuente elegida. Más adelante veremos la necesidad de poder regular la corriente de excitación.

Máquinas auto-excitadas

Como hemos dicho, la auto excitación consiste en alimentar el circuito inductor desde los mismos bornes del inducido; ello se puede hacer en tres formas distintas ilustradas en la figura 57.

En *a* se ve el circuito con excitación paralelo o derivación, que consiste en conectar el devanado inductor directamente a las escobillas.

En *b* tenemos el esquema de excitación serie, en el cual se hace pasar la corriente de consumo que produce el inducido por el circuito inductor.

Y finalmente en *c* se ve la excitación mixta o compound, en la cual el bobinado inductor está formado por dos partes: una conectada en derivación y la otra en serie con el inducido; el esquema *c* corresponde al tipo compound corta.

Si en cambio la sección derivación abarcara no sólo el inducido sino al conjunto de éste con el campo serie como se ve en la figura 58, tendremos el tipo llamado compound larga.

En el funcionamiento ambos tipos difieren muy poco, por lo que no se suele hacer un estudio separado; la única diferencia apreciable reside en el hecho de que no habiendo ninguna carga conectada, el campo serie del compound corta queda sin excitación y el de la compound larga se excita muy débilmente.

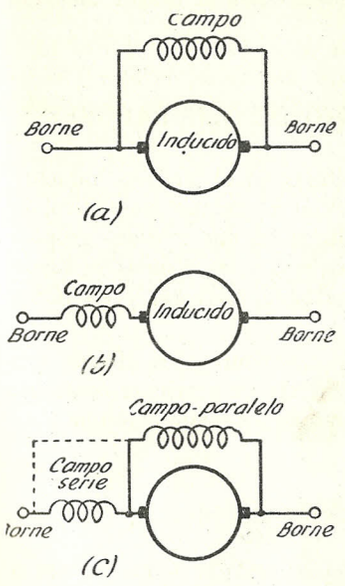

Fig. 57. — Esquemas de conexiones de las máquinas autoexcitadas: a) excitación en derivación; b) excitación en serie; c) excitación mixta o compound.

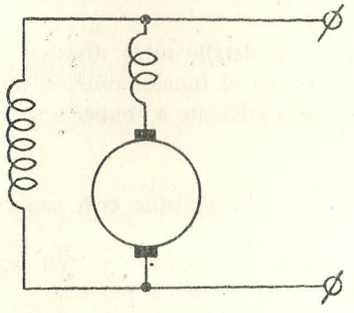

Fig. 58. — Esquema de la conexión compound larga, que difiere levemente de la figura 57 c.

Además de la diferencia señalada, hay que destacar una de mayor importancia que no se refiere a los dos casos de compound entre sí sino a cada uno de ellos en particular. Como es sabido, si se invierte el sentido de corriente del bobinado alterará el sentido del campo magnético que él produce, de modo que según cuáles extremos derivación y serie se elijan para entrada y salida de corriente de excitación se obtendrá que los campos magnéticos producidos por ambos tendrán sentidos iguales o contrarios. Como los dos bobinados están colocados en una misma masa polar, según se ve en la figura 59, sucederá que las líneas de fuerza tendrán sentido como se ve en *a* en cuyo caso la excitación se denomina compound adicional; o como se ve en *b*, donde los campos se restan, teniéndose la excitación compound diferencial.

Como los dos campos responden en distintas formas a las variaciones de carga, se obtendrá condiciones de funcionamiento muy diferentes según cuál de los dos tipos de compound se elija.

Aplicación de los diversos tipos

Tenemos las máquinas con *excitación independiente* y las *auto-excitadas*. Las primeras son utilizadas únicamente en usinas de importancia, de manera que estarán generalmente fuera del alcance del instalador electricista, mientras que las segundas son más comunes en las de menor tamaño, y en todos los motores, puesto que ya que en ellos se conecta el inducido a la red, también se conectará el circuito de campo, entrando en la categoría de auto-excitación, sólo por analogía con los generadores de igual tipo de conexión, y no porque provea el mismo motor la energía eléctrica para el campo.

La excitación en derivación se usa para generadores o dinamos comunes, para producción de energía eléctrica, cuando no son de potencia considerable, en cuyo caso se utiliza la excitación independiente por permitir una mejor constancia de tensión en la red.

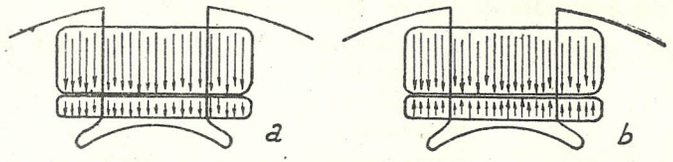

Fig. 59. — Sentidos aditivos o sustractivos de los dos campos de la excitación compound.

El esquema b) de la figura 57, muestra las conexiones para el caso de excitación en serie. Este tipo de excitación tiene la característica que el devanado de campo está recorrido por la misma corriente que el inducido. Tiene poca aplicación en generadores.

La excitación mixta o compound está representada en la figura 56, esquema c). Se trata, como se puede ver, de una combinación de dos campos, uno en serie y otro en derivación, para obtener parte de las ventajas de ambos tipos de excitación.

Así en el caso de los generadores, los tipos derivación tienen el inconveniente que la tensión en los bornes se reduce al aumentar el consumo, mientras que los generadores conectados en serie, como al aumentar la carga se excitan más los campos (por estar recorridos por la corriente principal de consumo), la tensión en los bornes crece con el aumento de consumo, hasta ciertos límites por supuesto. Aprovechando las dos características simultáneamente, se tendría que la tensión en los bornes de la dinamo se puede mantener constante a cualquier corriente de carga.

Se tiene así el generador compound adicional, cuyo campo serie no es tan fuerte como el derivación, pues sólo se quiere de él que compense las caídas de tensión que el campo derivación es incapaz de equilibrar.

Otro caso de generadores compound, es el de los equipos de soldar por arco, para corriente continua (soldadura eléctrica). En ellas, el trabajo normal es en condición de cortocircuito, que es accidental en los otros tipos de gene-

radores. Los generadores derivación tienen una corriente de cortocircuito muy reducida, mientras que en los tipos serie, es excesiva; combinando ambas características, se tendrá una corriente de cortocircuito grande, pero sin llegar a perjudicar la máquina.

Se usa entonces, para soldadura los generadores compound diferencial, con sus campos derivación y serie en oposición de efectos, siendo este último no tan intenso como el derivación, pero mayor que en el caso de generadores de tensión constante.

Reacción del inducido

En el devanado de un inducido de un generador sabemos que circula corriente eléctrica, y que en todos los conductores de un lado del rotor correspondiente a la mitad del mismo que queda debajo de un polo, están recorridas por corriente de un cierto sentido. La otra mitad de conductores están recorridas por corrientes de sentido contrario (fig. 60).

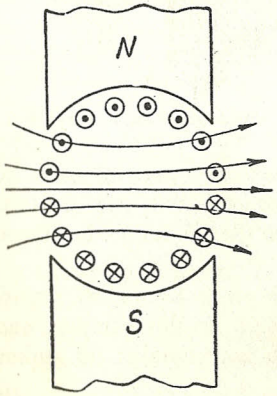

Fig. 60. — Campo magnetico transversal producido por las corrientes del inducido en una máquina eléctrica.

Para cualquiera de los conductores de la mitad superior del inducido y dada la polaridad magnética y sentido de giro indicados en la figura, resulta de la aplicación de la regla de la mano derecha que la corriente circulante es saliente del plano de la figura. La misma regla permite demostrar que en la mitad inferior, la corriente es entrante.

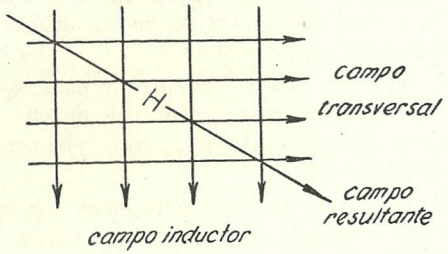

Fig. 61. — Composición gráfica de los campos principal y transversal.

Se forma así una figura enteramente similar a la que corresponde al corte longitudinal de un solenoide que produce un campo magnético del sentido indicado, es decir: transversal al principal (N — S) de la máquina. Como dos campos magnéticos ubicados en el mismo lugar del espacio deben sumarse vectorialmente para obtener el campo resultante, si se hace la composición vectorial de los dos campos de la figura 60 la dirección de la resultante será la de la recta indicada H en la figura 61. Y en el espacio comprendido entre ambos polos el campo resultante tomará el aspecto que se ve en la figura 62.

Se nota de inmediato que en los costados marcados *a* de los polos o expansiones polares, se produce una concentración magnética que provocará la saturación del hierro y con ello la reducción del flujo magnético que afectará a la f.e.m. inducida.

Obsérvese que, de acuerdo al sentido de giro indicado, todo pasa como si el inducido arrastrara consigo a las líneas de fuerza en su rotación.

Volviendo ahora a considerar el campo magnético producido por los conductores del inducido debemos resaltar que el mismo tiene una intensidad que depende de la corriente que lo produce. A distintas cargas se tendrán entonces distintas variaciones como las de la figura 62. Esto conspira contra la eficacia de los métodos más simples para evitar los efectos de la reacción del inducido.

Hay dos formas de combatir la reacción transversal: el calaje de escobillas y los devanados compensadores.

En el primer sistema se desplazan las escobillas en un ángulo alfa con respecto con las líneas neutras, según se ve en la figura 63. Ese *calaje* debe ser

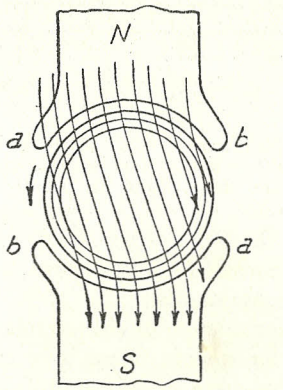

Fig. 62. — Deformación del campo inductor debida al campo transversal.

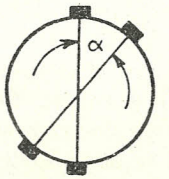

Fig. 63. — Calaje de escobillas para compensar el efecto del campo transversal.

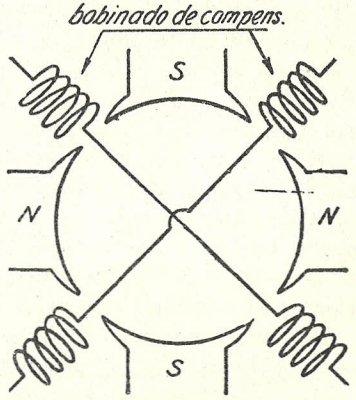

Fig. 64. — Devanados compensadores del efecto del campo transversal del inducido.

ajustable con la carga, mayor a medida que la corriente de consumo crece. Con esto se evita en parte uno de los efectos de la reacción del inducido, que es la de provocar chispas en las escobillas.

La imperfección del sistema es evidente puesto que habría que estar continuamente regulando la posición de las escobillas.

El otro sistema es más perfecto, pero más costoso; consiste en formar un campo magnético de la misma dirección pero de sentido contrario al del bobinado inducido; con él se anula el flujo transversal. Ese devanado se ubica en los espacios comprendidos entre cada par de masas polares como se ve en la figura 64, que corresponde a una máquina de cuatro polos, porque no se colocan en las máquinas de menos polos.

Para conseguir que la intensidad del campo magnético compensador equi-

libre en cualquier estado de carga al del inducido, estos devanados deben conectarse en serie con el bobinado inducido y con su mismo número de amper-vueltas, pero con polaridad magnética invertida.

Conmutación

Otro de los defectos de funcionamiento de los generadores eléctricos se producen en el contacto *colector-escobilla*. Al girar el colector la escobilla va rozando sucesivamente con todas sus delgas y se producirán instantes en que la escobilla abandona una delga. La bobina B de la figura 65 pertenece al devanado del inducido y sus extremos están unidos a delgas contiguas del colector. Cuando se separa la escobilla de la delga unida a uno de los extremos de la bobina, se extingue la corriente en la misma y estamos frente a la aparición de un fenómeno de autoinducción. En efecto, esa bobina había formado su campo magnético propio y al desaparecer la corriente también debe hacerlo el campo; en ese momento las líneas de fuerza barren los conductores que forman la bobina produciéndose una f.e.m. de autoinducción que se opondrá a la causa que la genera, esto es a la extinción de la corriente. Esa f.e.m. presente entre los extremos de la bobina da origen a una descarga en forma de chispa entre las delgas y la escobilla; esto es lo que se llama mala conmutación.

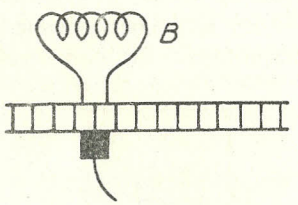

FIG. 65. — Posición de la escobilla cuando pone en cortocircuito una bobina del inducido.

Hay algunas formas de mejorar la conmutación reduciendo el chisporroteo entre escobillas. Uno de ellos es la de aumentar la resistencia intercalada en el camino de la descarga, para lo que se utilizan escobillas de carbón en lugar de metal. Pero esta solución es sólo apreciable en máquinas pequeñas, porque se empeoran las condiciones de trabajo.

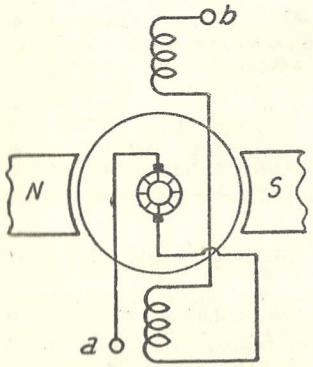

FIG. 66. — Polos auxiliares para neutralizar el fenómeno de autoinducción en la bobina cortocircuitada.

Otra solución más eficaz es la de emplear polos auxiliares ubicados en la línea neutra según se ve en la figura 66. La misión de los mismos es producir un campo magnético de igual dirección y con sentido contrario al campo de autoinducción de la bobina B. En el momento de la conmutación ese campo inducirá en la bobina una f.e.m. igual y opuesta a la de autoinducción impidiendo la descarga de la chispa.

En cuanto al empeoramiento de la conmutación provocada por la reacción del inducido, según hemos visto, sabemos que se evitan con el calaje de las escobillas o más eficazmente con los devanados compensadores.

CURVAS CARACTERÍSTICAS

Características en vacío

Se denomina característica en vacío o magnética al gráfico que demuestra cómo varía la f.e.m. inducida al regular la corriente de excitación. En la figura 67 se ve el esquema necesario para poder obtener dicha característica en un generador con excitación independiente.

En el circuito del inductor se intercala un reóstato a los efectos de poder variar la intensidad de excitación, la que puede leerse en el amperímetro.

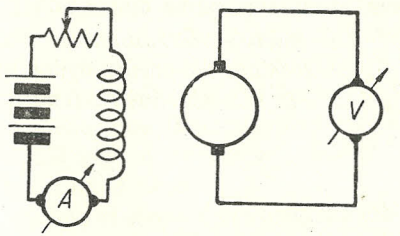

FIG. 67. — Esquema de conexiones para obtener la característica de vacío o magnética.

En el circuito del inducido sólo se conecta un voltímetro que consume muy poca corriente por lo que puede suponerse a la máquina desprovista de carga, es decir, en vacío.

Si se hace lectura en ambos instrumentos tomando los valores de la tensión para cada valor de la corriente de excitación y se llevan a un gráfico se obtiene la curva de la figura 68, cuyo aspecto nos resulta conocido, por haberla visto en la figura 11 al hablar de núcleos de hierro.

Se ve que a excitación reducida la tensión crece proporcionalmente, pero a valores mayores de i_x la tensión comienza a aumentar cada vez menos.

Esto se explica porque el núcleo del inductor se satura y aunque aumente la intensidad del campo magnético producido por la bobina, el flujo no aumenta en el mismo grado y por ende tampoco la f.e.m.

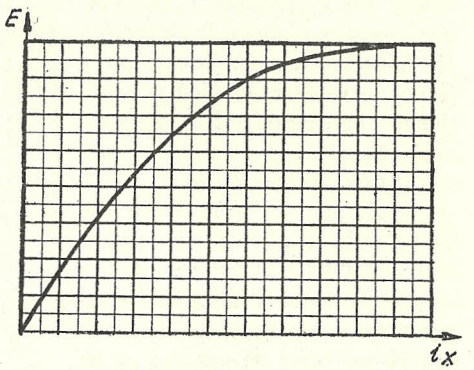

FIG. 68. — Curva característica de vacío o de saturación de una máquina eléctrica.

La curva de la figura 68 no es entonces otra cosa que la característica de magnetización o imantación del hierro que forma el circuito magnético de la máquina. Para poder levantar las características en vacío es menester mantener la velocidad de giro del rotor absolutamente constante, porque sabemos que la f.e.m. depende de dicha velocidad y si variara se afectaría la curva por esa razón y no por las propiedades del núcleo, obteniéndose un gráfico deformado.

Para las máquinas con excitación derivación la característica en vacío es exactamente igual a la de la figura 69, puesto que al no haber carga no se presenta ninguna causa que afecte a la tensión de los bornes.

En las máquinas con excitación en serie no existe la característica magnética puesto que sólo pasará la corriente por su devanado inductor cuando también pase por el inducido, es decir cuando la máquina esté cargada y no en vacío.

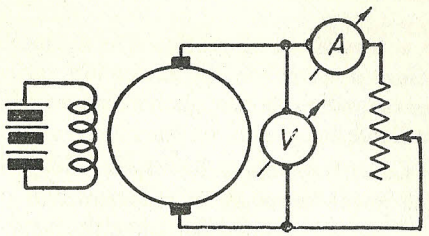

Fig. 69. — Esquema de conexiones para obtener la característica de carga, en máquinas con excitación independiente.

En las máquinas con excitación compound para obtener la característica magnética sólo funcionará el campo derivación y entonces se tratará de una máquina de tal tipo.

Por todas estas razones es muy común levantar la característica en vacío de cualquier máquina alimentando su inductor con una fuente independiente como se ve en la figura 67.

Característica de carga

En todo generador resulta imprescindible conocer cómo reacciona la máquina ante las variaciones del consumo, es decir, al variar la corriente principal del inducido. Para tal fin se conecta un voltímetro en los bornes y un amperímetro en serie con la carga se ve en la figura 69. La velocidad del giro del rotor y la corriente de excitación se mantienen constantes. El esquema corresponde a un generador con excitación independiente.

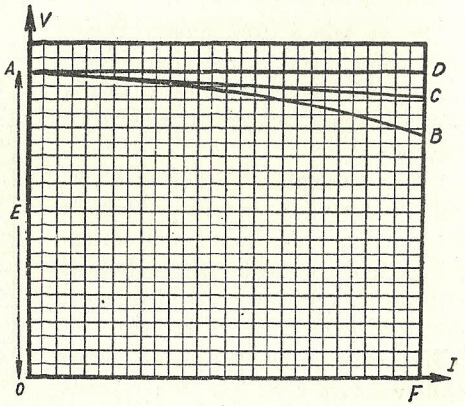

Fig. 70. — Curvas características de carga de un generador con excitación independiente o externa.

Variando la resistencia de carga se hacen lecturas en ambos instrumentos. Los valores obtenidos se llevarán a un gráfico representando en el eje de las abscisas la corriente de carga I, y en el eje de las ordenadas la tensión en los bornes V. La figura 70, curva A B, representa los resultados obtenidos. Se nota que la tensión en los bornes va disminuyendo a medida que aumenta la carga, y ello sucede por dos motivos distintos.

La f.e.m. inducida cuando el rotor gira en vacío (sin carga) esta dada por el segmento O A y si no existiera ninguna causa para que la tensión en los bornes disminuya, la característica de carga sería la recta A D, es decir: la que representa una tensión constante. Pero el devanado del inducido tiene resistencia óhmica y al pasar por él la corriente de carga se producirá una caída de tensión cada vez mayor a medida que aumenta el consumo. Luego si sólo existiera esa causa resultaría la recta A C, con pendiente lineal, puesto que la caída interna está dada por el producto IRi, siendo Ri constante. (Ri es la resistencia interna del devanado.) Eso es evidente ya que dependiendo la caída de tensión de la corriente de carga, los aumentos de dicha caída seguirán proporcionalmente a las de I.

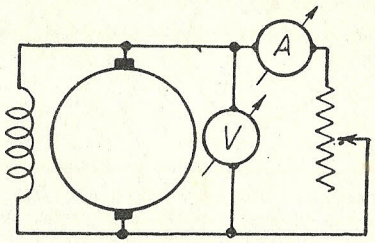

Fig. 71. — Esquema de conexiones para obtener la característica de carga en máquinas con excitación en derivación.

La segunda razón que hace disminuir la tensión en los bornes es el efecto del campo magnético producido por las espiras del bobinado del inducido. Ese fenómeno que denominamos reacción del inducido o transversal, debilita al flujo principal provocando una disminución de la f.e.m.

Como el efecto de la reacción depende de la intensidad de su campo magnético y ésta depende directamente de la corriente que recorre las bobinas del inducido, la disminución en la f.e.m. y por ende la reducción de la tensión de los bornes van aumentando cuando crece la corriente de carga. En la figura, el efecto mencionado está representado por los segmentos tales como el *C B* restado verticalmente de la resta A C, dando por resultado la curva A B, que es precisamente la característica de carga del generador.

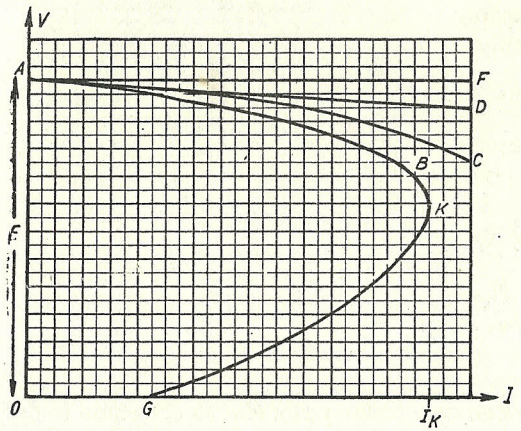

Fig. 72. — Curvas características de carga en máquinas con excitación en derivación.

Generadores con excitación derivación.

La característica de carga en este tipo de máquina difiere de la anterior. Para comprobarlo se utiliza el esquema de conexión de la figura 71 cuya única diferencia con el de la figura 69 es que el circuito del inductor se conecta directamente en las escobillas del generador.

En este caso tenemos tres causas que motivan la disminución de la tensión en los bornes de la máquina tal como se ve en la figura 72. La recta A F es la que representa la f.e.m. E si se mantuviera constante; si descontamos los

valores de la caída IR_i se obtiene la resta inclinada A D y si de esta última se descuentan los efectos de la reacción del inducido se obtiene la curva A C que es enteramente similar a la A B de la figura 70 y que sería la característica externa de nuestro generador si no interviniera una nueva causa que hace disminuir más aun la tensión de los bornes.

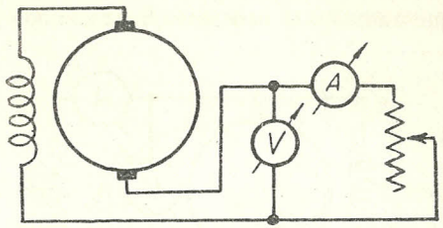

FIG. 73. — Esquema de conexiones para obtener la característica de carga en una máquina con excitación en serie.

En efecto, observando la figura 71 se ve que el bobinado inductor está conectado directamente a las escobillas o sea a los bornes de la máquina, y si la tensión entre esos bornes disminuye se reducirá la corriente de excitación produciéndose una desmagnetización con el consiguiente efecto sobre la f.e.m.

Los segundos representativos de esa nueva disminución se restan de AC y la característica de carga resultante es la curva A K G. El punto K se llama crítico y se produce para una corriente de carga I_k "crítica", alcanzada la cual la tensión en los bornes cae definitivamente hasta que el voltímetro indica cero.

En estas condiciones se dice que la máquina está en cortocircuito. No hay tensión en los bornes y la corriente del inducido toma el valor OG llamado corriente de cortocircuito, que es mucho menor que la crítica.

Generadores con excitación en serie.

En estos generadores el campo está conectado en serie con el inducido de modo que en vacío, o sea sin carga, no hay f.e.m. puesto que la máquina no está excitada.

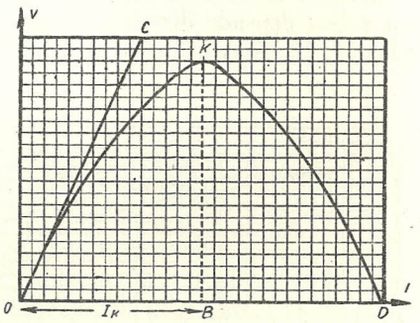

FIG. 74. — Curvas características de carga de un generador con excitación en serie.

Haciendo el esquema de la figura 73 se constata que mientras el circuito exterior está abierto el voltímetro indica cero.

Cerrando el circuito y comenzando a circular corriente de carga empieza a producirse el campo magnético en el inductor y con ello va creciendo la f.e.m. A medida que aumenta la carga crece la f.e.m. inducida por aumentar el campo magnético y se comprueba que la tensión en los bornes indicada por el voltímetro es cada vez mayor según se ve en la figura 74.

Si sigue aumentando la corriente comienza a notarse los efectos de la caída interna y de la reacción del inducido, porque en lugar de obtenerse valores de la tensión que están sobre la recta O C resultará la curva O K. En el punto K llamado crítico se alcanza la máxima tensión en los bornes que es el valor K B, y que corresponde a una corriente O B, llamada intensidad crítica (I_k).

Si aumenta la carga pasando del punto B la tensión en los bornes comienza a caer bruscamente hasta que se llega al punto D que se produce para una corriente de cortocircuito O D, y la máquina en tal condición tiene tensión en los bornes nula.

Obsérvese que la corriente de cortocircuito es muy grande, contrariamente a lo que sucedía en el generador derivación. La máquina serie no puede trabajar en cortocircuito.

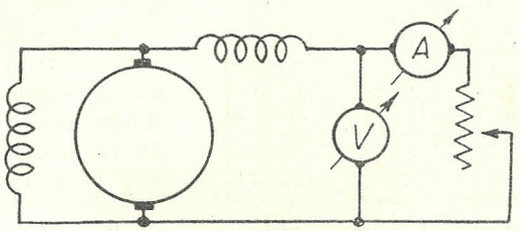

FIG. 75. — Esquema de conexiones para obtener la característica de carga en una máquina con excitación mixta o compound.

Generadores con excitación compound.

Si la máquina tiene dos devanados inductores, uno conectado en derivación, proyectado como para una máquina de tal tipo y otro conectado en serie con número de espiras reducido con respecto al que necesitaría si tuviera sólo esa excitación, se obtienen dos clases de características de carga fundamentalmente distintas.

Si los dos campos están conectados de modo que sus flujos magnéticos se suman como se ilustra (a, fig. 59) se tiene el compound adicional y si se restan (b, fig. 59) se tiene el compound diferencial; veamos cómo son las características obtenidas en cada caso, con el esquema de la fig. 75.

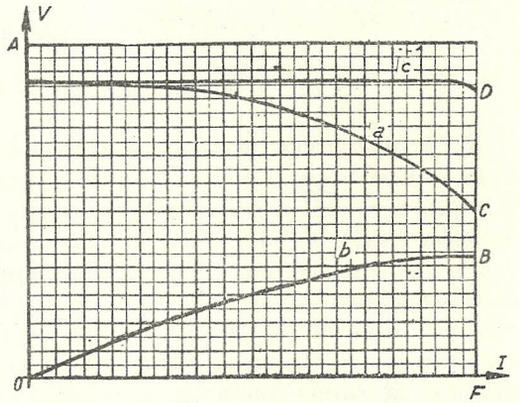

FIG. 76. — Curvas características de carga de un generador con excitación compound adicional.

En la figura 76, se muestra el caso del resultado obtenido del compound adicional. La curva "a" representa la característica de carga del generador derivación en su tramo utilizable. La curva "b" representa la que se obtendría si sólo existiera el campo serie.

La máxima tensión obtenida sería B F que no necesita ser mayor que la disminución máxima de D C, que se produce en la curva "a". Como los efectos

de los dos campos se suman, hallamos la resultante de las curvas a b sumando sus ordenadas; se obtiene la curva c que es la característica del generador compound adicional.

Como se ve, resulta que la tensión en los bornes se mantiene prácticamente constante para cualquier carga dentro de la zona de utilización de la máquina. Esta condición hace que estos generadores resulten muy apropiados para usinas.

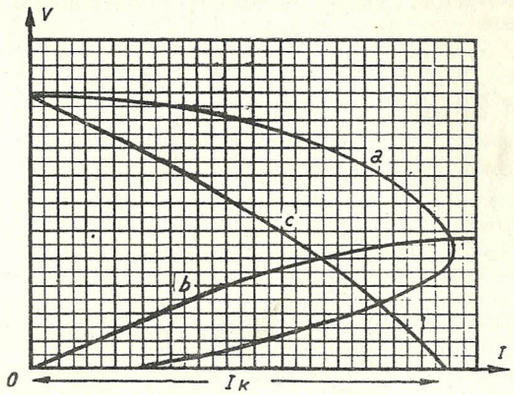

FIG. 77. — Curvas características de carga de un generador con excitación compound diferencial.

Si en cambio se trata de obtener la característica de carga del generador compound diferencial, se tendrán que restar las ordenadas de la curva a y b tal como se ve en la figura 77.

De esa operación resulta la curva c que es la característica buscada y que revela la aplicación inmediata de este tipo de generador. En efecto, como su corriente en cortocircuito es mayor que en los derivación y menor que en los serie, resulta conveniente para soldadura eléctrica, donde el generador que alimenta el arco eléctrico trabaja casi continuamnte en cortocircuito.

Regulación de la tensión

De la observación de las características de carga del generador derivación o de excitación independiente resulta evidente que la tensión en los bornes se reduce a medida que aumenta la corriente de consumo. Surge la necesidad de poder regular dicha tensión, para mantenerla si no constante por lo menos dentro de límites tolerables. Es claro que tal problema se presenta en las usinas, donde se utilizan los dos tipos de generadores mencionados; el tipo compound adicional, o no necesita regulación o la requiere en pequeña escala. El generador serie y el compound diferencial no se utilizan en usinas y no interesa mantener la tensión constante.

La posibilidad de la regulación de la tensión puede comprenderse observando a la figura 68 que representa la variación de la f.e.m. del generador cuando se regula la corriente de excitación.

De modo que si pretendemos mantener constante la tensión en los bornes habrá que ir aumentando la f.e.m. a medida que crece la carga para compensar la caída interna y los efectos desmagnetizantes de la reacción del inducido y del debilitamiento de la excitación.

Si se monta un esquema como el de la figura 78 se tratará de mantener una indicación constante en el voltímetro para cualquier lectura en el amperímetro de carga; para ello será necesario ir aumentando la corriente de excitación mediante el reóstato *R*.

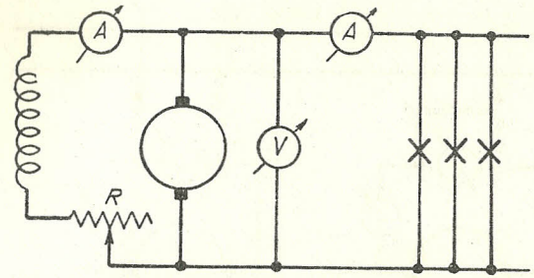

FIG. 78. — Esquema de conexiones para obtener la característica de regulación.

Si se anotan los valores necesarios de la corriente de campo para cada valor de la corriente de carga mientras se va manteniendo la indicación del voltímetro, se puede dibujar con ellas una curva como se ve en la figura 79.

Se trata de la característica de regulación, que permite en una usina conocer de antemano cómo debe variarse la excitación ante las variaciones de carga. Generalmente el reóstato se dispone detrás del tablero de maniobras e instrumentos y se lo maneja mediante un volante.

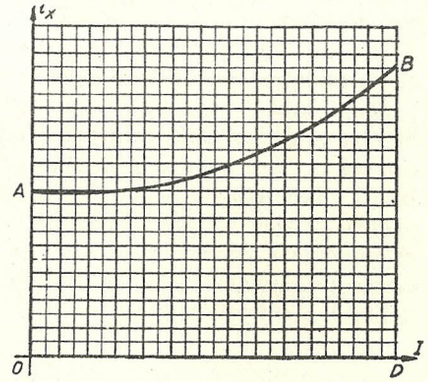

FIG. 79. — Curva característica de regulación de un generador excitado en derivación.

Paralelo de generadores

En una usina el consumo es muy variable a distintas horas del día. Como sabemos que el rendimiento de una máquina es mayor a plena carga, no convendrá tener un solo generador de la potencia total necesaria trabajando todo el día, pues la mayor parte de éste su potencia resultaría excesiva para cubrir un consumo mucho menor que el máximo horario.

Por tal motivo se suelen tener dos o más generadores que van entrando en servicio a medida que el consumo lo requiera. Cada vez que un generador se debe acoplar a las barras principales de la usina se presenta el problema de un acoplamiento en paralelo.

Trataremos el caso de dos generadores según se ve en la fig. 80. Cada máquina tiene un sistema de regulación, su amperímetro que acusa la carga y su voltímetro que acusa la tensión en los bornes; un interruptor bipolar sirve

para conectar esos bornes a la barra o puente entre todas las salidas de alimentación de la usina y llegadas del generador.

Para poner en paralelo dos generadores se deben cumplir dos condiciones: igualdad de tensión e igualdad de polaridad. Esto último quiere decir que

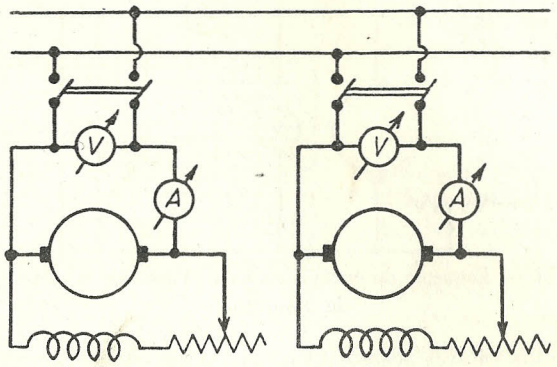

FIG. 80. — Conexión en paralelo de dos generadores excitados en derivación.

deben unirse entre sí los polos de igual signo *positivo* con *positivo* y *negativo* con *negativo*.

En una instalacion estable esto se cumple desde el momento que se verifica el conexionado que se hace cuando se instala el generador.

La igualdad de tensiones se verifica mediante lecturas en los voltímetros. Si una máquina está trabajando, cuando se desea conectar la otra sólo se cerrará la llave cuando la lectura en su voltímetro sea levemente superior a la del voltímetro de la primera máquina; y debe ser superior, porque en el mismo instante en que la máquina acoplada comienza a aportar corriente en el circuito, se producirá en ella una caída de tensión. Si la primera máquina estaba trabajando en vacío el acople de la segunda se hace a igualdad de indicación del voltímetro.

CAPÍTULO IV

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Un generador de corriente continua es una máquina reversible, es decir que si se alimenta su rotor con corriente de la red funciona como motor. Veamos qué sucede en cada espira del inducido.

Si volvemos a la figura 41, colocando nuevamente el conductor en forma de espira dentro del campo magnético del imán, pero en lugar de hacerlo girar lo conectamos a una fuente de energía eléctrica, que en el caso real sería la red de distribución, tendremos el caso de la figura 81.

Al circular corriente por el conductor, que está sumergido en el campo, se origina una acción de carácter dinámico entre ambas magnitudes físicas,

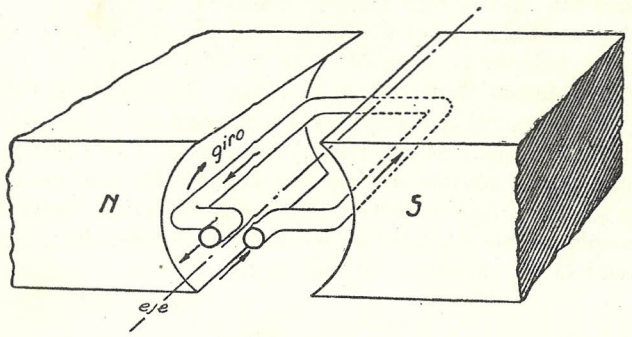

FIG. 81. — Principio elemental del funcionamiento de un motor eléctrico.

actuando sobre el conductor una fuerza que tiende a desplazarlo fuera del campo. Como el conductor sólo puede moverse alrededor del eje, girará mientras dure la corriente, y corte líneas de fuerza.

Para encontrar el sentido en que se desplazará el conductor, se aplica la *regla de la mano izquierda* (ver también fig. 16), colocando la palma de la misma estirada de modo que las líneas de fuerza entren por la palma misma y

salgan por el dorso, pero los cuatro dedos desde el índice hasta el meñique señalarán el sentido de circulación de la corriente. El pulgar, extendido en forma saliente desde la mano, indicará el movimiento del conductor.

En el caso de la figura 81, la rama izquierda de la espira está recorrida por corriente de atrás hacia adelante; se colocará, entonces, la mano izquierda estirada en posición vertical, con la palma vuelta hacia el polo Norte del imán (N en la figura), y los dedos señalando hacia afuera del papel. El pulgar señalará hacia arriba, y ese será el sentido de giro de la espira. Resultará más cómodo aplicar la misma regla a la rama derecha, puesto que en este caso, los dedos estirados señalarán hacia adentro del papel, y la palma estará vuelta hacia el norte. El pulgar indicará hacia abajo, como corresponde, puesto que la rama del otro lado del eje tiene movimiento ascendente.

De esto resulta, pues, que la espira tendrá un movimiento giratorio hasta llegar a la posición vertical, en que no cortará más líneas de fuerza por moverse cada rama de ella horizontalmente, es decir, en sentido paralelo a las líneas del campo. El movimiento debería cesar, pero la inercia se encarga de que el conductor pase de la posición máxima vertical, y entre nuevamente en la zona donde cortará líneas de fuerza. Pero obsérvese que, como el sentido de circulación de la corriente no ha cambiado, tendremos en la rama izquierda corriente entrante, es decir, de adelante hacia atrás, y en la rama derecha, de atrás hacia adelante, ambas contrarias a las que teníamos antes de llegar la espira a la posición vertical, por lo que, al aplicar la regla de la mano izquierda, obtendremos sentidos de giro contrarios de los anteriores, y el movimiento se frenaría, para comenzar a efectuarse en sentido contrario.

Es fácil imginar que tal estado de cosas no tendría utilización práctica, pues tal como pasa con la media vuelta que hemos descripto, pasará con todas las demás medias vueltas, originándose una suerte de movimiento pendular.

Para tener un movimiento circular continuo, se debe invertir el sentido de la corriente cada vez que el conductor pasa por una de las posiciones extremas verticales, inferior o superior. Esto se consigue con el conmutador o colector que habíamos ilustrado en la figura 44, pues como las escobillas están fijas en el espacio, la corriente entra al conductor que está conectado a la delga del colector que roza con ella, siempre en el mismo sentido, desfilando todos los conductores durante una vuelta completa. De aquí en adelante podemos repasar los detalles constructivos de los generadores de corriente continua, pues son completamente similares en los motores. Veamos los fundamentos del funcionamiento.

Leyes que rigen el funcionamiento

Supongamos un circuito magnético bipolar en el cual se aloja la espira de modo que pueda girar libremente y se hace pasar corriente por dicha espira; nos encontramos en el caso de un conductor recorrido por corriente eléctrica y sumergido en un campo magnético. Es sabido que en tales condiciones se originará sobre ese conductor una fuerza que tenderá a desplazarlo fuera del

campo. Dicha fuerza es tanto mayor cuanto más grande sea la intensidad del campo magnético, cuanto más largo sea el conductor y cuanto mayor sea la corriente. Expresando algebraicamente el valor de la fuerza:

$$F = \frac{H\,l\,I}{9{,}81 \times 10^6}$$

Donde el divisor numérico tiene por objeto reducir la fuerza a Kg. cuando H se da en Gauss, l en centímetros e I en Amper.

De la observación de la fórmula resulta la conveniencia de tomar todas las magnitudes que en ella aparecen lo más grandes posible para obtener esfuerzos útiles considerables, pero cualquiera de esos tres factores inciden en el costo y tamaño del motor.

Por definición el momento de una fuerza con respecto a un eje se llama cupla o par motor, momento de giro, momento torsor o torcente, o torca, y está dado por el producto de la fuerza por el radio de giro:

$$M = F\,R$$

Aplicaremos este concepto a la espira girante de nuestro motor elemental. En la figura 82 vemos que a cada lado de la espira está aplicada una fuerza F, distando cada una del eje de una cantidad R, que es el radio de giro. Luego la cupla motora será doble a la de una sola fuerza. Reemplazando en la expresión de la cupla el valor de la fuerza dado más arriba, se tiene:

$$M = \frac{2\,H\,l\,I\,R}{9{,}81 \times 10^6}$$

Observando la expresión obtenida se ve que en ella aparece el producto de la longitud l de la espira por el ancho $2\,R$. Ese producto puede ser reemplazado por:

$$2\,R\,l = S$$

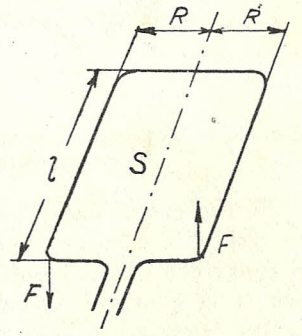

Fig. 82. — Dimensiones relativas de la espira elemental.

Donde S es la superficie abarcada por la espira, que es igual a la que ocupa el flujo magnético total del motor. Como el producto de la intensidad de campo por la superficie que ésta atraviesa da el total de líneas de fuerza o sea el flujo magnético:

$$H\,S = \Phi$$

Se puede reemplazar en la expresión de la cupla la consideración precedente y resulta:

$$M = \frac{\Phi\,I}{9{,}81 \times 10^6} = K\,\Phi\,I$$

Donde en la letra K hemos englobado las constantes numéricas de la expresión final. Resulta entonces que la cupla depende directamente del flujo que

proporciona el circuito inductor y de la corriente que recorre el bobinado del inducido o rotor, que proviene de la red.

El flujo magnético necesario para el circuito inductor se produce mediante bobinados arrollados sobre masas polares y recorridas por una corriente llamada de excitación, en forma completamente similar al caso de los generadores.

El devanado inductor debe ser alimentado desde la red, igualmente que el inducido, pero las conexiones recíprocas de ambos circuitos dan origen a muy diferentes condiciones de funcionamiento, caso que también ocurría en los generadores. Por de pronto no se utiliza la excitación independiente por razones prácticas.

La figura 83 a, muestra el esquema de un motor con el circuito inductor conectado en paralelo con el inducido en cuyo caso se denomina excitación derivación.

Si el bobinado de excitación se conecta en serie con el rotor, tenemos el caso de la figura 83 b, obteniéndose el motor con excitación en serie.

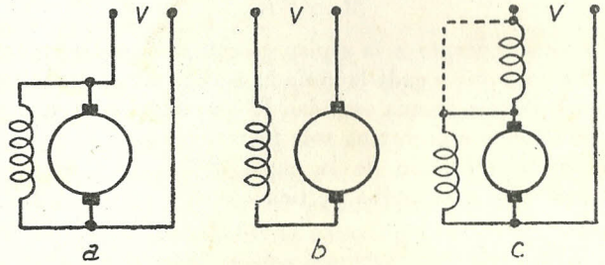

FIG. 83. — Esquemas de conexiones de motores eléctricos: a) excitación en derivación; b) excitación en serie; c) excitación mixta o compound.

Y finalmente, puede haber dos bobinados inductores que se conectan uno en serie y otro en derivación según el esquema de la figura 83 c, resultando el motor con excitación compound. El ilustrado se denomina compound corta porque la sección derivación abarca sólo el inducido; si tomamos también el campo serie, según línea punteada de la figura, se tiene la compound larga.

Fuerza contra-electro-motriz

En cuanto pasa corriente por el bobinado del rotor, se produce la acción dinámica entre la corriente y el campo magnético y el motor comienza a girar. Pero en cuanto los conductores del rotor se mueven cortan las líneas de fuerza del campo y ya se sabe que por tal motivo se inducirá en ellos una fuerza electromotriz. De acuerdo con la ley de Lenz, la fuerza electromotriz tiende a oponerse a la causa que la genera, es decir, que en el caso que nos ocupa tenderá a frenar al rotor.

En efecto, consideremos la figura 84, que muestra una espira colocada dentro del campo magnético. Dentro de los círculos que indican los cortes de

los lados de la bobina se han marcado los sentidos de circulación de la corriente que proviene de la red de alimentación.

Aplicando la regla de la mano izquierda se encuentra que la espira será impulsada en el sentido indicado en la figura. Pero al moverse los conductores que la forman dentro del campo se inducirá una f.e.m., cuyo sentido se encuentra con la regla de la mano derecha, como vemos en la figura, tal sentido es contrario al de la corriente principal. Por tal motivo a esa f.e.m., se la llama fuerza contra-electro-motriz y obliga a aumentar la tensión aplicada al motor para que se asegure la circulación de corriente en el rotor.

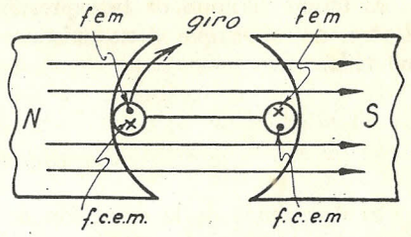

FIG. 84. — Sentidos de las f.e.m. y f.c.e.m. en una espira girante.

Veamos el valor de la fuerza motriz. Si una espira corta un flujo a razón de n revoluciones por minuto la f.e.m. inducida tendrá un valor:

$$e = \frac{\Phi n}{10^8 \times 60}$$

Si, en vez de una espira hay un conjunto N de espiras en el rotor formando un bobinado cerrado, la f.e.m. valdrá:

$$E = \frac{\Phi N n}{10^8 \times 60}$$

Consideraremos por ahora que el motor tiene solamente dos polos y el bobinado sólo dos entradas de corriente. Se pueden englobar los términos constantes como el número de espiras, el de polos, etc., y los factores numéricos en una letra K, que representa a todos ellos, con lo que quedará la expresión reducida de la f.c.e.m.:

$$E = K \Phi n$$

donde se ve que sólo depende del flujo inductor y de la velocidad del rotor. Cualquiera de los dos factores que se alteren afectará a la fuerza contra-electro-motriz.

Tensión aplicada al motor

El motor se va a conectar directamente a la red de alimentación, con lo que circulará una corriente que debe tener un valor preestablecido para obtener una cupla motora determinada. Al paso de dicha corriente por el bobinado del motor y los de campo que hubiera en serie se producen caídas de tensión de valor: $I \times r_i$, en donde r_i representa todas las resistencias intercaladas en el paso de la corriente.

La tensión aplicada al motor debe cubrir dichas caídas y además vencer a

la f.c.e.m., luego el valor que debe tener se deduce de inmediato sumando la f.c.e.m. E y las caídas:

$$V = E + I r_i$$

El último término de la expresión es generalmente pequeño con respecto al otro, de modo que si no existiera f.c.e.m., la tensión a aplicar sería muy reducida.

Arranque del motor

Si deducimos de la expresión de la tensión el valor de la intensidad de corriente que toma el motor de la red resulta:

$$I = \frac{V - E}{r_i} = \frac{V - K \Phi n}{r_i}$$

En esta expresión hay algunas cantidades constantes como V, tensión de la red, K y r_i; el flujo, si la excitación es derivación, también es constante. Veamos el valor de la corriente en el momento de conectar el motor a la red. Como la velocidad en ese instante es nula por estar el motor detenido, el segundo término del numerador vale cero, quedando para la intensidad el valor:

$$I_a = \frac{V}{r_i}$$

que es muy grande, muchas veces mayor que el normal.

Como no es posible colocar un bobinado capaz de soportar esa corriente que sólo dura un instante, hay que limitar la corriente de arranque a valores permisibles para el bobinado. Se acostumbra a limitar dicha corriente inicial del motor, que llamaremos I_a, a un valor 50 % superior al de la corriente normal I_n, de modo que se tiene: $I_a = 1{,}5\ I_n$. Para conseguir esa limitación sólo hay un recurso: ya que la tensión no puede modificarse, se aumenta la resistencia intercalada en el paso de la corriente mediante el agregado de un reóstato en serie como se ve en la figura 85.

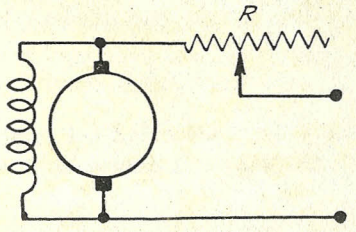

FIG. 85. — Reducción de la intensidad de arranque mediante inserción de una resistencia en serie con el motor.

El valor total de dicho reóstato se obtiene poniendo en la fórmula que da la corriente de arranque I_a, el valor aceptado 1,5 I_n, y sumando a la resistencia de los bobinados de inducido y campo serie el valor del reóstato R; se tiene:

$$1{,}5\ I_n = \frac{V}{r_i + R}$$

De dicha expresión puede deducirse el valor total del reóstato mediante simple trasposición de términos:

$$R = \frac{V}{1{,}5\ I_n} - r_i$$

En la práctica se elimina sin inconveniente el valor de r_i de la expresión anterior, porque muchas veces es desconocido, y tal omisión redunda en un reóstato de valor levemente superior al mínimo necesario.

El reóstato R rara vez se construye a cursor como se ilustra en la figura, sino que se le hacen derivaciones espaciadas irregularmente a fin de poder mantener la intensidad fluctuando entre el valor normal y el superior aceptado 1,5 I_n. Además, como en la expresión de la cupla aparece el flujo, no es posible que el bobinado de campo quede conectado en serie con el reóstato de arranque porque se limitaría considerablemente la corriente de excitación y la cupla sería insuficiente para el arranque. El campo debe tener, pues, excitación plena, es decir, estar conectado directamente a la tensión de la red; esto se consigue dotando a la manija del reóstato de un patín adicional de contacto que desliza durante toda la maniobra en un arco metálico. El patín principal va apoyando sobre los sucesivos topes, eliminándose el reóstato gradualmente hasta que el rotor adquiere la velocidad normal.

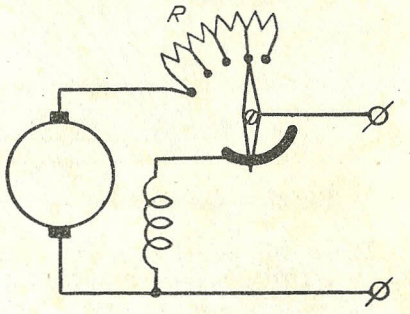

FIG. 86. — Conexión correcta del reóstato de arranque para no debilitar el campo inductor.

La maniobra dura algunos segundos. La figura 86 da el esquema correcto de conexiones, notándose en ella que para cualquier posición de la manija el campo queda conectado a la tensión total de la red.

Cálculo del reóstato de arranque

Para hacer el cálculo del reóstato de arranque se pueden seguir dos caminos: el analítico y el gráfico.

Generalmente se prefiere el segundo por su mayor sencillez. Para comprender el procedimiento gráfico hay que tener en cuenta que se acepta que la intensidad llegue a valer 1,5 veces la normal del motor y si se deja conectado el reóstato total esa corriente irá decreciendo a medida que aumenta la velocidad del rotor, puesto que comienza a producirse la f.c.e.m.

No hay ninguna ventaja en permitir que la corriente se haga menor que el valor normal, de modo que al llegar a ese grandor puede reducirse el valor del reóstato en la medida suficiente para que la corriente alcance nuevamente el valor 1,5 I_n. Aquí volverá a reducirse el valor de la intensidad y se dejará

llegar otra vez hasta el valor normal, y así sucesivamente hasta eliminar por completo el reóstato. Veamos el procedimiento gráfico del cálculo: Se toma un eje horizontal OA (fig. 87) y uno vertical OD; se toma un punto F intermedio tal que OF sea igual a 2 FD, o lo que es lo mismo OD igual 1,5 OF.

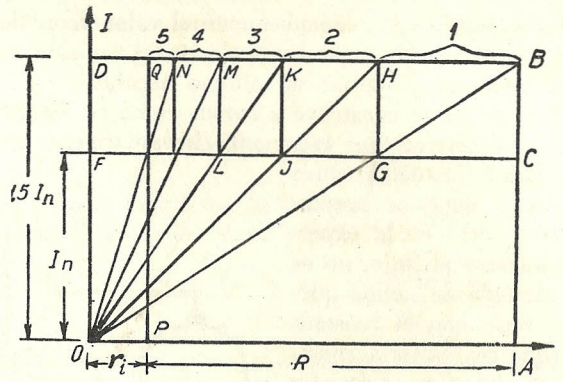

FIG. 87. — Cálculo gráfico del reóstato de arranque de un motor eléctrico.

Luego OF puede representar en cierta escala la intensidad normal del motor y OD la corriente máxima de arranque.

Se trazan horizontales FC y DB; sobre la recta OA se toman los segmentos OP y PA; el primero representa la resistencia de los bobinados del inducido y demás que estuvieran en serie con ellos; PA, en la misma escala, representa el valor total del reóstato calculado con la expresión:

$$R = \frac{V}{1{,}5\ I_n} - r_i$$

El punto B indica el comienzo de la operación; la intensidad va disminuyendo paulatinamente hasta G, en cuyo punto alcanza el valor I_n igual OF. Aquí se puede eliminar la porción GC del reóstato, con lo que la corriente volverá al valor 1,5 I_n y llegaremos bruscamente al punto H. Aquí vuelve a disminuir la intensidad hasta que lleguemos a J, donde se puede eliminar la fracción JG del reóstato.

Siguiendo en esta forma pasamos a los puntos K y L; aquí eliminaremos la fracción LJ, al M, N, etc.

En este último punto vemos que no vale la pena seguir haciendo subdivisiones del reóstato, por lo que la fracción restante NQ se puede quitar en el circuito en el último golpe de manija. Resulta así que el reóstato, cuyo valor total está representado por PA, ha quedado subdividido en cinco fracciones que se han indicado con las llaves 1, 2, 3, 4, 5. Cada fracción está representada en la misma escala por los segmentos GC, JG, etc.

Regulación de velocidad

Como hemos visto anteriormente, la expresión de la tensión en los bornes del motor es:

$$V = E + I\,r_i$$

En la que sabemos que la f.c.e.m. es proporcional al flujo y a la velocidad de giro, es decir:

$$E = K\,\Phi\,n$$

de modo que, sustituyendo su valor en la fórmula de la tensión, queda:

$$V = K\,\Phi\,n + I\,r_i$$

En esta nueva expresión aparecen cantidades conocidas o fácilmente determinables; nos interesa despejar el valor de la velocidad, n, que es el número de revoluciones del motor; operando:

$$n = \frac{V - I\,r_i}{K\,\Phi}$$

Para variar la velocidad del motor sólo podemos afectar a dos de las cantidades que aparecen en la fórmula anterior. En efecto, la tensión en la toma no es posible modificarla, pero sí puede provocarse una caída de tensión adicional, intercalando una resistencia en serie en el bobinado del rotor. Es la R_2 de la figura 88. Al pasar la corriente de carga por dicha resistencia se produce una caída de potencial y la tensión aplicada al rotor es menor que la de la red. Con esto se reduce el numerador de la expresión de *n*, con lo que se reducirá la velocidad. Haciendo la resistencia variable se tiene la posibilidad de una regulación entre grandes límites, pero como la resistencia absorbe energía que se disipa en forma de calor, la potencia del motor se reducirá, de modo que este método no sirve para cambiar definitivamente la velocidad del motor.

Para aumentar la velocidad podemos reducir el denominador de la expresión de n, es decir el flujo, para lo cual basta intercalar el reóstato R_1 en serie con el bobinado de campo. Al aumentar la resistencia del circuito inductor circulará menos intensidad de corriente y el flujo magnético disminuirá.

Este procedimiento para aumentar la velocidad tiene sus límites, puesto que el flujo interviene como factor en la expresión de la cupla motora, de modo que al disminuir el flujo se requerirá, la cupla.

En los casos de los motores serie, como veremos más adelante, la velocidad está dada automáticamente por la carga, pero si se desea un incremento ocasional de la velocidad se recurre al procedimiento indicado en la figura 89.

Consiste en conectar en paralelo con el bobinado de campo una resistencia variable R. Como la expresión de la velocidad es general para toda clase de motores, reduciendo el flujo debe aumentar la velocidad.

Al conectar la resistencia R en paralelo, la corriente que toma el motor se reparte en las dos ramas formadas por la resistencia y el devanado de campo y por este último circulará entonces menos intensidad, se producirá menos flujo y por ende, la velocidad aumenta.

En los casos de los motores excitación compound veremos que tienen una

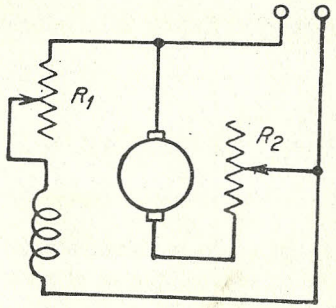

FIG. 88. — Conexión de reóstatos para regulación de la velocidad en un motor con excitación en derivación.

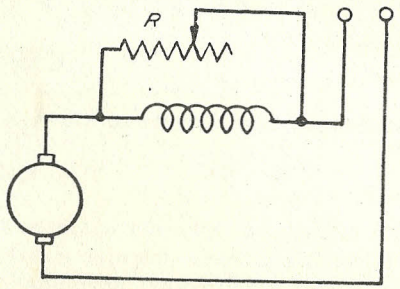

FIG. 89. — Conexión de un reóstato para regulación de la velocidad en un motor con excitación en serie.

característica de velocidad constante, de manera que no se justifica que se trate de regularla en aumento o disminución.

Curvas características de motores

Las características de funcionamiento de motores de corriente continua revelan las relaciones que hay entre algunas de sus magnitudes variables en función de las otras. Generalmente se toma como cantidad o magnitud de referencia a la intensidád que absorbe de la red, porque ésta es un índice del esfuerzo que está realizando el motor. Las magnitudes que se estudian en función de la corriente son la cupla y la velocidad de giro.

Motores derivación.

La figura 90 muestra la forma como varía la cupla y la velocidad al aumentar la corriente de carga. Al principio, la cupla crece linealmente, pero luego comienza a aumentar en forma menos notable.

La velocidad decrece paulatinamente con la carga, de modo que a plena carga el motor gira algo más despacio que en vacío.

Motores serie.

La cupla aumenta notablemente con la carga, como se ve en la figura 91. La velocidad tiene una característica de variación hiperbólica, debido a que con carga reducida el flujo será pequeño y, como sabemos, la velocidad grande,

de acuerdo con la expresión de n. Al aumentar la carga aumenta también el flujo, con lo que se reduce también la velocidad.

Esta característica hace ideal a este tipo de motores para vehículos eléctricos, que deben arrancar lentamente absorbiendo fuerte intensidad para vencer la inercia y a memida que el coche se acelera va reduciéndose la intensidad de corriente.

Pero debe observarse que hay que tener la precaución de no conectarlo nunca en vacío porque, según se ve en la figura 91, a muy baja corriente de consumo correspondería una velocidad enorme para la cual no fué diseñado

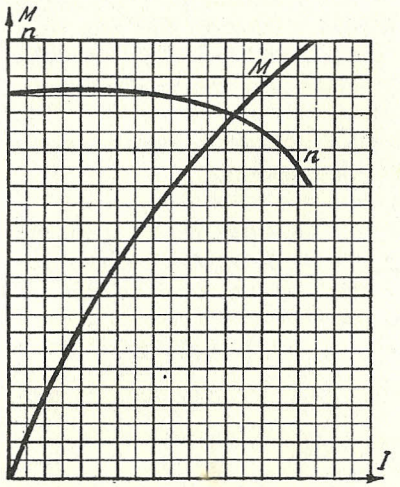

FIG. 90. — Curvas características de cupla y velocidad de un motor con excitación en derivación.

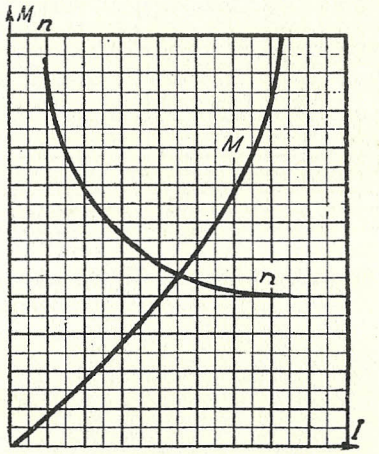

FIG. 91. — Curvas características de cupla y velocidad de un motor con excitación en serie.

el motor; como los devanados están sujetos al rotor mediante sunchos, la fuerza centrífuga provocada por muy altas velocidades puede ocasionar la rotura de los sunchos y, por consiguiente, la destrucción del devanado. Se dice que el motor "dispara". Empleándoselos únicamente de modo que arranquen siempre con carga se está a cubierto de tal contingencia.

Motores compound.

Los motores derivación resultan aptos para todo servicio donde se requiere una velocidad poco variable (máquinas-herramientas).

Los motores serie son apropiados para cuando la velocidad debe variar mucho con la carga.

Hay casos en que se busca un motor de velocidad lo más constante posible, de modo que los anteriores no se prestan a ese efecto.

Se recurre entonces al motor compound diferencial, con un campo derivación normal cuya característica de velocidad es la curva 2 de la figura 92.

El campo serie tiene mucho menos cantidad de amper-vueltas que el otro y se conecta de manera que su flujo se reste al del campo derivación. La característica de velocidad del campo serie es la número 1 de la figura 92.

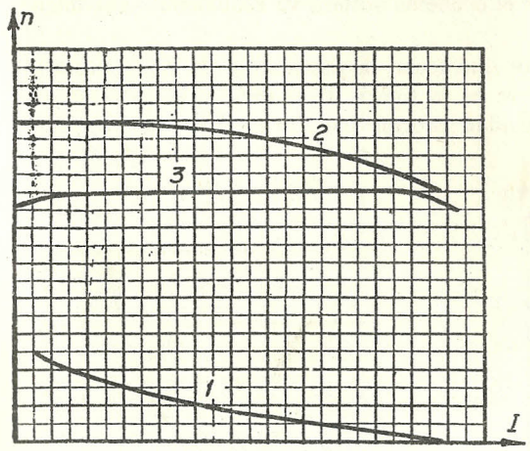

FIG. 92. — Curvas características de velocidad en un motor con excitación compound.

Restando las ordenadas de ambas curvas se obtiene la curva 3, que es la característica resultante de velocidad, y que resulta ser casi una recta horizontal. Es decir, la velocidad será bastante constante.

Comparación de las cuplas de arranque.

La corriente de arranque en los motores, se acepta que sea 1,5 veces la normal, es decir:

$$I_a = 1{,}5\ I_n$$

Veremos cómo resulta la cupla de arranque para los tres tipos de motores que hemos mencionado.

La cupla normal tiene por expresión, según se vió:

$$M_n = K\,\Phi\,I_n$$

Luego, para el motor derivación, como el flujo en el arranque es igual que a plena carga, y la corriente de arranque es 1,5 de la normal, resulta:

$$M_a = K\,\Phi\,1{,}5\,I_n = 1{,}5\,M_n$$

Y resulta poco mayor que la normal. En motores serie, la corriente de arranque es la misma que produce el flujo, y como ella es 1,5 I_n, el flujo también será 50 % mayor:

$$M_a = K\,1{,}5\,\Phi\,1{,}5\,I_n = 2{,}25\,M_n$$

Es decir que la cupla de arranque es más del doble de la normal, lo que hace apto a estos motores para arrancar a plena carga.

Los motores compound, como tienen campo serie débil, puede considerarse que no influye en el arranque, y entonces tendrán características similares a los motores derivación.

Partes del motor

De acuerdo con la descripción anterior, se tendrá que el motor de corriente continua estará formado por los mismos elementos que el generador (dinamo), es decir, por el circuito magnético, el colector, las escobillas y el devanado del inducido o rotor.

La similitud es de tal grado que cualquier generador de corriente continua trabaja como motor, con sólo conectarlo a la red de canalización o alimentarlo con otro generador, de mayor potencia, se sobreentiende. La técnica ha impuesto ciertas diferencias constructivas de detalle que, como el objeto de esta publicación no es el estudio de las máquinas en sí, sino de sus arrollamientos, se dejará para otra oportunidad.

Tenemos entonces, que la descripción de las escobillas y porta-escobillas hecha para los generadores puede extenderse a este párrafo, que se refiere a los motores, así como la clasificación de los circuitos magnéticos en bipolares, tetrapolares y, opcionalmente, multipolares.

En efecto, una pieza suelta de una máquina eléctrica, como podría ser una escobilla o un devanado de los circuitos inductores (bobinados de las masas polares), tanto puede pertenecer a un generador como a un motor eléctrico, pudiendo solo distinguirse su destino una vez que se lo ve colocado, observando el resto de la máquina.

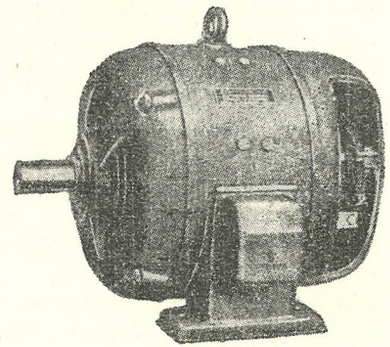

FIG. 93. — Aspecto característico de un motor de corriente continua.

La diferencia substancial entre el generador y el motor, insistimos en ello, es que el primero es accionado por un motor de impulsión, para entregar energía eléctrica al circuito de consumo, mientras que el segundo se conecta a la red de distribución eléctrica, para entregar energía mecánica en forma de movimiento, y accionar así a cualquier máquina. A veces, esta máquina acoplada al motor es, precisamente, un generador eléctrico, como en el caso de los grupos convertidores.

La figura 93 muestra un tipo común de motor de corriente continua, en el que puede observarse uno de los porta-escobillas, la caja de bornes y el saliente del eje para la colocación de la polea. Se trata de una máquina cuya carcasa es de acero laminado igual que sus pies. Se construyen para potencias de 0,3 a 10 Kilowatt, habiendo modelos herméticos con refrigeración forzada mediante ventiladores centrífugos.

CAPÍTULO V

GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA

Las máquinas de corriente alternada fueron utilizadas en la práctica posteriormente a las de corriente continua, pese a que en las espiras elementales de estas últimas se produce corriente de la primera clase mencionada. En tal situación la técnica fué dirigida hacia la obtención de corriente continua, para lo que se enderezó la corriente inducida en las espiras mediante el colector o conmutador.

Más adelante, con el progreso de la ciencia, se aportaron nuevas ideas sobre utilización de la corriente alternada y sus ventajas en la economía del transporte y en el costo de generadores y motores, volviéndose a las máquinas rotativas pero sin colector.

En la utilización industrial de las máquinas de corriente alternada se las clasifica en dos grandes grupos: generadores o alternadores y motores, y estos últimos a su vez, admiten una segunda clasificación en sincrónicos y asincrónicos. Otros tipos de motores de corriente alternada tienen conmutador, como son los tipos serie, a repulsión, a doble alimentación, en derivación, etc.

Los generadores de corriente alternada o alternadores funcionan bajo el siguiente principio: si se coloca una espira dentro de un campo magnético y se la hace girar, sus dos lados cortarán a las líneas de fuerza del campo, induciéndose entonces una corriente eléctrica que puede ser recogida en los extremos del conductor que forma la espira (repasar la fig. 21). Veremos inmediatamente que la corriente inducida es de carácter alternado.

Si en lugar de hacer girar la espira se hace girar al campo magnético, dejando fija la espira, se producirá exactamente el mismo fenómeno, puesto que lo que lo produce es el desplazamiento relativo entre los conductores y las líneas de fuerza del campo. ¿Cuál de los dos sistemas es más conveniente? La respuesta es inmediata, pues en el primer caso se debe recoger la corriente producida en la espira, pero como ésta se mueve, se tendrán contactos deslizantes. La corriente de excitación de los electroimanes para la producción del campo magnético, es mucho más pequeña que la corriente inducida, y si

ellos están fijos, los bornes de entrada y salida también lo estarán, no habiendo contactos deslizantes.

Está claro que si es lo mismo hacer girar a la espira o a los campos magnéticos, convendrá hacer girar a aquella parte que conduce corrientes de menor valor, porque entonces los contactos deslizantes deberán dejar paso a corrientes más pequeñas. Esto es lo que se hace con los alternadores, y como veremos más adelante, también con los motores reve sibles, de construcción similar a los alternadores, que son los sincrónicos.

Principio de funcionamiento

Veamos la figura 94. Representa la versión más simple de un alternador, pudiendo verse el electroimán que proporcionará el campo magnético que debe barrer a los conductores de la espira fija, durante su giro completo. Se ha colocado una sola espira para simplificar la comprensión del dibujo, pero en la realidad hay muchas más, conectándose entre sí en la forma como se verá en el capítulo de bobinados. El electroimán gira en el sentido indicado, arrastrado por un motor de impulso, que puede ser una máquina a vapor, una turbina térmica o hidráulica, un motor de combustión interna, etc. a razón de *n* revoluciones por minuto. Esta letra n la reservaremos en todo el libro para designar la velocidad citada.

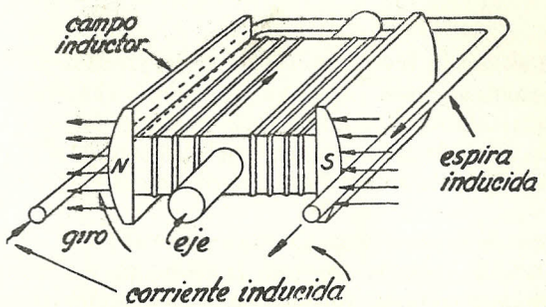

FIG. 94. — Principio de funcionamiento de un alternador.

De acuerdo con el sentido del devanado del electroimán, se obtiene al circular corriente continua por él una polaridad magnética determinada, que hemos indicado arbitrariamente en la figura. Para encontrar esta polaridad, en la práctica, se puede aplicar la regla del tirabuzón (figura 8).

Regla del tirabuzón.

Si se hace girar a un sacacorchos imaginario en el sentido en que la corriente de excitación recorre el bobinado del electroimán, él avanzará en un sentido tal que el extremo por donde sale es el polo Norte magnético y el otro el Sur. En la figura se ha indicado en una de las espiras del bobinado del electroimán un sentido de corriente, y de acuerdo con él se obtiene la polaridad magnética que se señala N y S.

Al girar el electroimán, que se denomina generalmente rotor o inductor, las líneas de fuerza de su campo magnético cortan a los conductores que forman

la espira, y se inducirá entonces en ellos una f.e.m. cuyo valor depende de la velocidad del corte, de la densidad magnética y de la longitud de los conductores de la espira. El sentido de dicha fuerza electromotriz se puede determinar mediante el auxilio de la regla de la mano derecha.

Regla de la mano derecha.

Colocando la palma de la mano extendida de manera que enfrente a las líneas de fuerza del campo magnético, y que quede perpendicular a las mismas, se coloca el dedo pulgar en posición de máxima separación con respecto a la palma, y de forma que se dirija hacia el lado en que el conductor va cortando a las líneas de fuerza. Los dedos estirados determinan el sentido de la f.e.m. inducida.

Para el caso de la figura 94, tomemos el conductor de la izquierda que está frente al polo Norte. La palma debe quedar en posición vertical y vuelta hacia la derecha de la figura, para que reciba las líneas de fuerza de frente. El pulgar debe quedar hacia abajo, porque el conductor tiene un desplazamiento imaginario en esa dirección, puesto que las líneas de fuerza suben, lo que equivale a un descenso del conductor. Los dedos estirados en esa posición de la mano, señalan hacia adentro del papel, es decir, que la f.e.m. inducida tiene el sentido indicado en la figura. Aplicando ahora la misma regla al conductor de la derecha, la palma se coloca también vertical y vuelta hacia la derecha, pero el desplazamiento relativo del conductor respecto de las líneas de fuerza es hacia arriba, con lo que la f.e.m. inducida tendrá el sentido indicado por los dedos restantes, esto es, hacia afuera.

Forma de la f.e.m. inducida

Cuando el electroimán está en la posición horizontal de la figura 94, se produce el corte máximo de líneas de fuerza; cuando alcanza la posición vertical, ninguna línea de fuerza cortará al conductor; en posiciones intermedias las líneas son cortadas oblicuamente, por lo que el valor de la f.e.m. inducida disminuirá con respecto al valor correspondiente a la posición horizontal y seguirá disminuyendo hasta anularse en la posición vertical del inductor. Al sobrepasar la posición vertical, la f.e.m. comienza a producirse otra vez pero en sentido contrario, porque el sentido del desplazamiento del campo con respecto al conductor se invierte. En esta forma la f.e.m. irá aumentando su valor hasta llegar a la posición horizontal, en que alcanza el valor máximo, y desde donde empieza a disminuir de nuevo, llega a la posición vertical invertida, se produce una nueva inversión del sentido de la corriente y así sucesivamente.

Una f.e.m. de tales características es, precisamente, la alternada, por lo que la corriente inducida en la espira tendrá tal carácter. Como la espira está fija, sus bornes terminales sirven para recoger la corriente sin inconvenientes puesto que no hay contactos rozantes.

La corriente necesaria para excitar al elcctroimán inductor se toma de una batería o de un pequeño generador de corriente continua (es más frecuente esto último) y se la hace entrar en el rotor mediante dos escobillas que rozan continuamente contra dos anillos metálicos, conectados uno de ellos a la entrada del devanado y el otro a la salida.

La espira o conjunto de espiras de las que se toma la corriente generada se denominan estator o inducido, y de la forma de bobinarlo nos ocuparemos más adelante.

Valor de la fuerza electromotriz inducida

La f.e.m.i. en una espira que gira dentro de un campo magnético es alternada y por lo tanto se puede representar gráficamente como se ve en la figura 95,

Es sabido que entre los valores alternados hay relaciones fijas. Así si llamamos E_{max} al valor máximo de cresta. E_m al promedio de valor durante

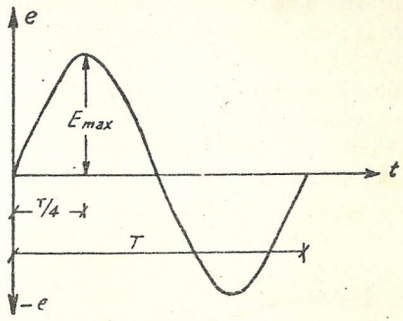

FIG. 95. — Forma de la f.e.m. inducida en el alternador.

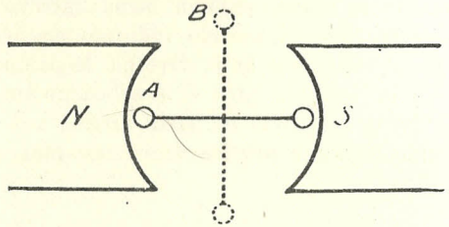

FIG. 96. — Posiciones límites de la espira. durante su giro.

medio ciclo y E al valor medio cuadrático o eficaz, o sea el valor que indica un voltímetro conectado entre los bornes, entre esos valores hay las siguientes relaciones:

$$E_m = \frac{2}{\pi} E_{max} = 0{,}64\ E_{max}$$

$$E = 0{,}707\ E_{max}$$

De manera que conociendo cualquiera de ellos pueden encontrarse los otros dos. Supondremos una espira colocada dentro de un campo magnético en la forma que se ve en la figura 96.

Deduciremos el valor de la f.e.m. durante un cuarto de ciclo o sea un cuarto de vuelta, puesto que sabemos que al dar una vuelta completa se habrá producido un ciclo de la corriente alternada.

Si la espira da n vueltas por segundo, el tiempo tardado en dar una vuelta será:

$$T = \frac{1}{n}$$

El flujo máximo de que se dispone es Φ y es el que corta a la espira en la posición A. A medida que va girando va cortando menos flujo hasta que al llegar a la posición B se mueve paralelamente a las líneas de fuerza, es decir: no corta nada.

El valor de la f.e.m.i. en todo conductor que se desplaza en un campo magnético está dado:

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} 10^{-8}$$

fórmula que da los valores en cada instante o sea para cada posición de la espira. Deduciremos el valor medio entre las posiciones A y B, es decir, el promedio de todos los valores instantáneos que se inducen durante un cuarto de vuelta, puesto que en el resto de la vuelta se tendrán valores idénticos como lo evidencia la figura 95. En la última expresión se puede reemplazar la variación del flujo por:

$$\Delta \Phi = \Phi$$

puesto que si el flujo cortado pasa de un valor máximo a un valor nulo se produce una variación igual al valor máximo.

El tiempo empleado en cortar ese flujo, o en dar un cuarto de vuelta será:

$$\Delta t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4\,n}$$

Reemplazando en la expresión de la f.e.m. los valores obtenidos se tendrá el valor medio de dicha f.e.m.:

$$E_m = \frac{\Phi}{\frac{1}{4\,n}} 10^{-8}$$

en la que se pueden hacer algunas simplificaciones algebraicas resultando:

$$E_m = 4\,n\,\Phi\,10^{-8}$$

Pero carece de interés el conocer el valor medio, siendo preferible obtener el eficaz. Para ello determinamos el valor máximo multiplicando la expresión anterior por $\frac{\pi}{2}$ según se deduce de las relaciones entre ellos:

$$E_{max} = \frac{\pi}{2} 4\,n\,\Phi\,10^{-8}$$

Y ahora para hallar el valor eficaz no hay más que multiplicar esta última fórmula por 0,707, resultando:

$$E = 0{,}707 \frac{\pi}{2} 4\, n\, \Phi\, 10^{-8} = 4{,}44\, n\, \Phi\, 10^{-8}$$

donde el número 4,44 ha sido obtenido realizando las operaciones numéricas indicadas.

El valor de f.e.m. dada por la expresión anterior corresponde a una sola espira, cosa que no se realiza nunca en la práctica. Generalmente se coloca un bobinado formado por N espiras en serie, de modo que las ff.ee.mm. inducidas en todas ellas se suman resultando una f.e.m. total N veces mayor:

$$E = 4{,}44\, N\, n\, \Phi\, 10^{-8}$$

El valor de esta f.e.m. es teórico puesto que intervienen algunos factores que la hacen disminuir. Tales son: el factor de paso y el factor de distribución.

Factor de paso.

En la figura 96 se ha supuesto que la espira estaba colocada diametralmente en el inducido. Según la teoría de devanados que veremos más adelante cada espira abarca un paso menor o mayor que el polar. Luego la bobina en lugar de abarcar un ancho A A′ como se ve en la figura 97, abarcará

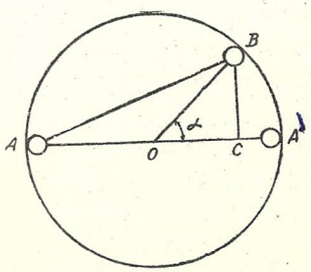

Fig. 97. — Espira diametral y espira en cuerda AA' y AB, respectivamente.

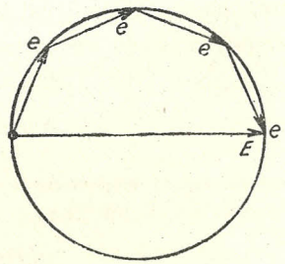

Fig. 98. — Efecto de la distribución del devanado en la f.e.m. inducida.

uno A B, o sea que en lugar de tenerse como ancho de bobina el diámetro A A′, se tendrá la cuerda A B.

Del flujo comprendido entre A y A′ sólo se aprovecha la parte A C perdiéndose la fracción A′ C. Deduciremos cuál es el factor de corrección a aplicar a la f.e.m. El paso teórico abarca un arco de 180 grados y el paso real uno de 180° menos α. La fracción AC vale (1 + cos α) y la AA′ vale 2.

Luego la proporción entre el flujo real abarcado y el flujo total es:

$$\beta = \frac{A\ C}{A\ A'} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

y se llama factor de paso, afectando la expresión de la f.e.m.

Factor de distribución.

Si se ejecutara el devanado del inducido colocando todas sus espiras en una sola ranura resultaría una dimensión exorbitante del núcleo de hierro. Por tal motivo se prefiere repartir el bobinado en varias ranuras distribuídas en la periferia. Pero entonces, las ff.ee.mm. en cada espira no estarán en fase entre sí y no se podrán sumar aritméticamente sino vectorialmente.

Supongamos que dividimos el bobinado en 4 secciones repartidas regularmente en el contorno del inducido como se ve en la figura 98. Sus ff.ee.mm. tendrán sus fases en la forma ilustrada debiendo sumarse los 4 vectores *e* para obtener la f.e.m. total E.

Si las 4 tensiones *e* hubieran estado en fase, hubiera resultado una f.e.m. E mucho mayor.

Prácticamente se afecta la expresión de la f.e.m. del factor de distribución δ cuyos valores se dan en la siguiente tabla:

Ranuras por fase y por polo.....	2	3	4	5	6	8
Factor de distribución δ.....	0,966	0,96	0.958	0,957	0,956	0,956

Generalmente se adoptan cantidades de ranuras por fase y por polo comprendidos entre dos y seis. No se toman cantidades mayores porque con el máximo de 6 se consigue una buena distribución del devanado.

Frecuencia de la fuerza electromotriz inducida

Atendiendo a razones de economía en el costo del alternador y a la menor cantidad de pérdidas por corrientes parásitas, convendría utilizar corriente alternada de baja frecuencia. En efecto, a frecuencias mayores debe haber más polos y la máquina se encarece; además las pérdidas por corriente de Foucault o parásita dependen del cuadrado de la frecuencia de modo que al crecer f aumentan notablemente esas pérdidas.

Pero oponiéndose a esas razones está la de utilización de la corriente alterna. La práctica recomienda que para evitar que la vista perciba las fluctuaciones de las lámparas incandescentes, la frecuencia debe ser por lo menos de 50 ciclos por segundo.

Partiendo de esta base y respetando las consideraciones anteriores se ha elegido en muchas partes tal frecuencia, salvo excepciones donde se usa 60 ciclos por segundo.

Para poder obtener 50 c/s. con una máquina de 2 polos, el rotor debe dar 50 vueltas por segundo o sea 3000 por minuto. Si se colocaran 4 polos se cumplen 2 ciclos por vuelta por lo que bastará que el rotor de 1500 vueltas

por minuto y en general para un número de polos p y frecuencia f el número de revoluciones por minuto del rotor está dado por:

$$n = \frac{120\,f}{p}$$

debiendo elegirse el motor de impulso adecuado que suministre esa velocidad.

Obsérvese que para poder mantener constante la frecuencia no debe variar la velocidad de giro del rotor, de modo que no puede actuarse sobre ella para regular la f.e.m., como podía hacerse en los generadores de corriente continua. En la expresión de la f.e.m. se ve cuál es la magnitud que se puede regular, es decir: el flujo magnético.

Partes de que se compone el alternador

Un alternador está compuesto pues, por varias partes perfectamente separadas, cada una de las cuales tiene una misión bien definida. Ellas son: el estator, el rotor, la carcasa y la excitatriz. La figura 99 muestra la ubicación relativa de todas estas partes entre sí, en una representación resumida y más bien simbólica.

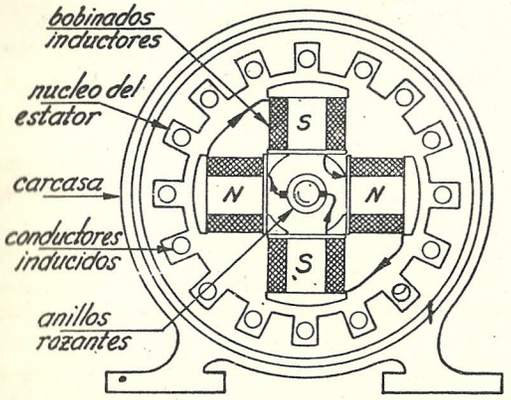

Fig. 99. — Disposición de las partes componentes en un alternador.

Pasaremos revista a cada una de las partes, para destacar lo que de ellas interese y describir los materiales de que están construídas según las ilustraciones siguientes.

Estator.

Está compuesto por el núcleo de chapas de palastro, sujetas, formando un paquete, mediante una serie de pernos o de chavetas en forma de cola de milano. Las chapas están aisladas entre sí, para evitar en lo posible las pérdidas producidas por las corrientes de Foucault, que se traduce en un calentamiento de los núcleos de hierro sometidos a campos magnéticos alternados, calor que se produce a expensas de la energía eléctrica de la máquina.

El estator tiene ranuras, en las que se alojan los conductores activos o inducidos, que forman el bobinado del estator y que se estudiará en capítulo aparte. Para aislar las bobinas del núcleo se colocan tubos de cartón aislante abiertos, ocupando una longitud ligeramente mayor que la de la ranura del núcleo.

La figura 100 muestra el aspecto del estator de un alternador, en el que pueden verse las ranuras laterales para la corriente de aire de refrigeración,

la que puede ser natural o forzada. Se ven asimismo, las ranuras con las bobinas colocadas.

Rotor.

El inductor o rueda polar, se suele construir de una sola pieza para las máquinas de reducido número de polos, o de un núcleo central macizo al que se fijan las masas polares, en las máquinas multipolares. El número de polos está ligado a la frecuencia de la corriente alternada inducida y a la velocidad de giro del motor, por la relación:

$$p = \frac{120\,f}{n}$$

es decir, que el número de polos es igual a 120 veces la frecuencia, dividido por el número de revoluciones por minuto. Como la frecuencia a obtener es un dato (generalmente se adopta f = 50) y la velocidad de giro del rotor depende de la máquina propulsora que se elija, el número de polos resultará grande para los alternadores movidos por turbinas hidráulicas o motores de combustión interna y pequeño para los accionados con turbinas a vapor. En el mismo eje del rotor suele estar fijo el inducido de la dinamo que provee la corriente de excitación, aunque a veces, esta dinamo puede ser independiente y movida por una transmisión a correas o engranajes.

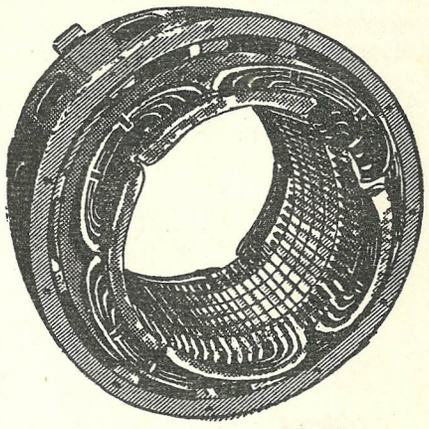

Fig. 100. — Vista del estator de un alternador.

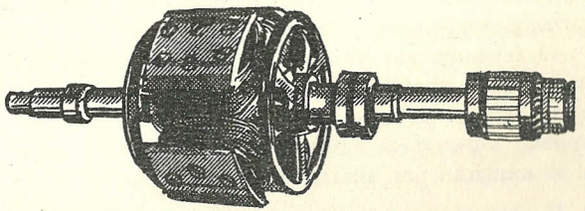

Fig. 101. — Vista de un rotor de cuatro polos.

La figura 101 muestra un rotor de cuatro polos, en el que pueden verse las masas y expansiones polares, las aletas de ventilación, los anillos rozantes por los que entrará la corriente a las bobinas de campo, y el rotor de la máquina excitatriz. Los anillos están aislados del eje por medio de micanita prensada.

Como se ve, la excitatriz está montada del lado opuesto del eje que recibe el accionamiento de la máquina propulsora.

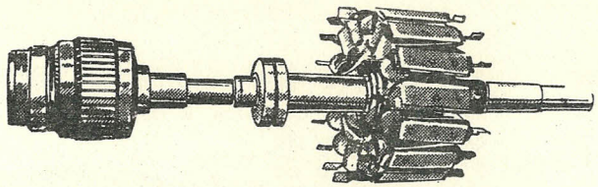

FIG. 102. — Vista de un rotor de 16 polos.

La figura 102 muestra un rotor de 16 polos, notándose que las masas polares tienen cierta inclinación longitudinal, a fin de obtener mejor forma de onda y evitar las armónicas superiores en la corriente inducida en el estator. También en este caso el rotor de la excitatriz está fijo al mismo eje.

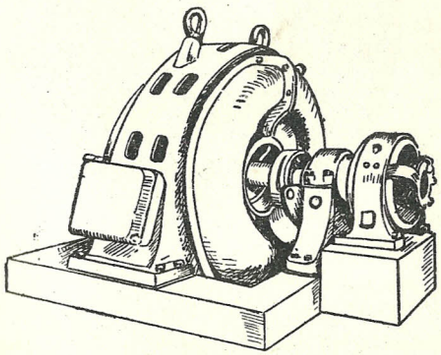

FIG. 103. — Vista de conjunto de un alternador completo.

Carcasa.

Es la parte externa de la máquina que envuelve al estator y comprende la cubierta, la base y los cojinetes. En la cubierta se encuentran los conductos y orificios para la ventilación. En los cojinetes se aseguran generalmente los portaescobillas para el inductor.

La figura 103 muestra un alternador completo, en el que se puede ver la excitatriz acoplada al mismo eje principal de la máquina; los anillos con los portaescobillas colocados; los orificios para la ventilación y la caja de bornes principales, en un costado.

La base está formada por un dado de hormigón, que debe tener dimensiones adecuadas para absorber las vibraciones que produce el movimiento de la máquina.

Posteriormente volveremos sobre los bobinados del rotor y del estator, de modo que se omitirán por ahora, mayores detalles.

CARACTERÍSTICAS DE ALTERNADORES

Las curvas características de funcionamiento de alternadores muestran cómo varía una de sus magnitudes fundamentales en función de las otras. Interesa saber especialmente cómo reacciona la máquina al variar el flujo magnético o la corriente de carga.

Las características usuales son las mismas que para los generadores de corriente continua aunque con algunas diferencias en su aspecto y menor cantidad, puesto que hay un solo sistema de excitación en corriente alternada, que es el de alimentación del campo con fuente exterior independiente.

Reacción de la armadura o inducido

Al circular corriente por los conductores del inducido o armadura se producirá un campo magnético que encontrará un circuito de hierro cerrado. Este flujo actúa sobre el campo inductor principal produciendo un efecto que puede diferir del que ocurría en corriente continua.

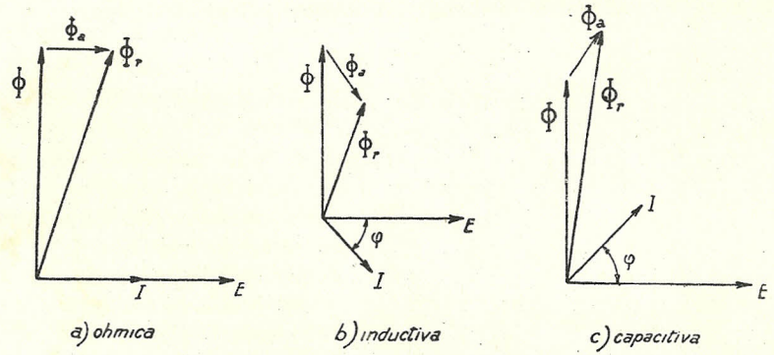

FIG. 104. — Diagramas vectoriales del alternador, mostrando el efecto de la reacción de la armadura para distintos tipos de carga.

En efecto, la corriente de carga puede estar en fase, atrasada o adelantada con respecto a la f.e.m. del alternador. En cada caso los efectos de la reacción de armadura son distintos.

Consideremos el caso que la corriente de carga esté en fase con la tensión, según se ve en la figura 104 a.

Como es sabido el flujo principal Φ adelanta 90° en la fase con respecto a E. El flujo de armadura está producido por la corriente de carga I de modo que su vector debe ser paralelo a ésta. Componiendo los dos vectores de flujo se obtiene el flujo resultante, que actuará sobre el devanado inducido; se nota en la figura que Φ_r no será muy distinto de Φ, de modo que el flujo de reacción producido por carga óhmica sólo tiene efecto deformante sobre el principal, como ocurre en las máquinas de corriente continua.

Veamos qué sucede con carga inductiva, es decir cuando la corriente atrasa con respecto a la tensión. En la figura 104 b se ha dibujado la f.e.m. E y perpendicular a ella el flujo principal Φ; la corriente atrasada I y su flujo de reacción Φ_a paralelo a I. Se nota que el flujo resultante resulta menor que el principal. De modo que la reacción de armadura provocada por carga

inductiva tiene un efecto desmagnetizante, que provocará una caída más enérgica de la tensión que si se tratara de carga óhmica.

Si la corriente adelanta con respecto a la tensión, es decir, si tenemos carga capacitiva, lo que es poco frecuente, el diagrama vectorial afecta a la forma de la figura 104 c. El flujo principal Φ siempre está perpendicular a la tensión E, y el flujo de reacción de armadura Φ_a paralelo a la corriente de carga I.

Se ve que el flujo resultante es mayor que el principal, lo que dice que la reacción transversal de una carga capacitiva tiene efectos magnetizantes y producirá un aumento de la tensión.

El caso práctico más común es el de carga inductiva, de modo que se puede afirmar que la tensión en los bornes de un alternador decrece con la carga más notablemente que en los generadores de corriente continua, lo que se pondrá en evidencia mediante las características de carga.

Característica de vacío o magnética

Si se regula la corriente de los campos, el flujo magnético variará en la misma proporción y como aparece en la expresión de la f.e.m., se producirán variaciones en esta última. Así, al aumentar la corriente de excitación aumenta el flujo y la f.e.m.

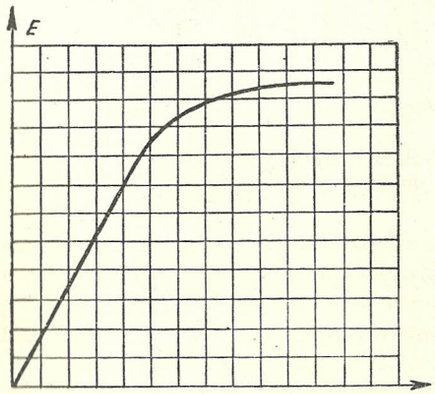

Fig. 105. — Curva característica de vacío o magnética de un alternador.

Parecería que al representar los valores de E (f.e.m.) en función de i_x (corriente de campo) se debería obtener una línea recta, pero no es así, puesto que al aumentar la excitación crece la densidad magnética en el núcleo, comenzando a producirse el fenómeno de saturación. Por tal motivo la característica de vacío afecta la forma de la figura 105 que es completamente similar a las curvas de imantación de núcleos de hierro mediante corriente eléctrica; por eso esta característica se suele llamar magnética.

Tiene una utilidad extraordinaria en el proceso de regulación de tensión en usinas, puesto que permite conocer qué valores debe darse a la corriente de excitación para obtener ciertos valores de la f.e.m., y por ende, de la tensión en los bornes del alternador. Nos referimos aquí a la llamada *característica de regulación* que será explicada más adelante. La curva de magnetización nos resulta ya familiar, pues la encontramos al ocuparnos de la figura 11.

Característica de carga

Al aumentar el consumo en el circuito de carga de un alternador, aumentarán también las caídas internas y el efecto de reacción de la armadura. Las caídas internas son de mayor magnitud que en las máquinas de continua porque además de resistencia óhmica, el devanado del inducido presenta efectos de reactancia, es decir, se originan fenómenos de autoinducción que provocan nuevas caídas internas.

Así como en una dinamo se habla de resistencia interna, en un alternador habrá que agregar a ese concepto el de reactancia interna. Si se engloba en este último factor el efecto de dispersión magnética o pérdida de flujo, se puede considerar una reactancia algo mayor que se llama *reactancia sincrónica*, que es mayor que la calculada teóricamente para el devanado, pero que coincide con la que se determina por mediciones. La resistencia óhmica y la reactancia sincrónica forman en conjunto la impedancia interna del alternador.

Si se representa gráficamente la tensión en los bornes en función de la corriente de carga se tendrán las curvas que corresponden a las características de carga.

Habrá que distinguir tres tipos de curvas, puesto que hemos visto que la reacción del inducido tiene distintos efectos, según la corriente de carga esté en fase, atrasada o adelantada con respecto a la tensión.

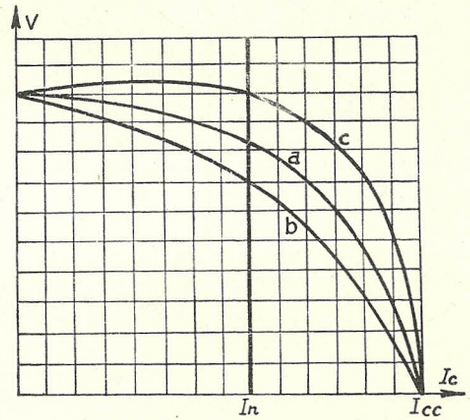

Fig. 106. — Curvas características de carga en un alternador. La (a) corresponde a carga óhmica pura; la (b) a carga inductiva y la (c) a carga capacitiva.

Si el circuito de consumo está formado exclusivamente por resistencia óhmica, la reacción transversal tiene efecto deformante sobre el flujo principal. La característica de carga es la curva a de la figura 106, similar a la de un generador de corriente continua, pero con mayor caída. En la figura se ha hecho llegar la curva hasta el cortocircuito, debiendo entenderse que la proporción entre I_{cc} e I_n, corriente normal, no es la real.

Si la carga es de carácter inductivo, por haber conectado muchos motores, la reacción de armadura tiene efecto desmagnetizante y el descenso de la tensión en los bornes debe ser más brusco, obteniéndose la curva b, de la misma figura 106.

Si se presenta el caso de que la corriente adelante con respecto a la tensión, es decir el caso de carga capacitiva, la reacción del inducido tiene efecto magnetizante; el flujo transversal se suma en parte al principal, obteniéndose un refuerzo de la f.e.m. al aumentar la carga, tal como lo demuestra la curva c.

Pero a cargas muy grandes esa situación no se prolonga y la curva cae también al cortocircuito.

Característica de regulación o de campo

Observando la figura 106, se nota que se puede conocer a cualquier valor de la carga, cual es el descenso que ha sufrido la tensión en los bornes. Para poder compensar ese descenso hay que aumentar la f.e.m. del alternador y si vamos a la figura 105, se nota que ello se consigue aumentando la corriente de excitación.

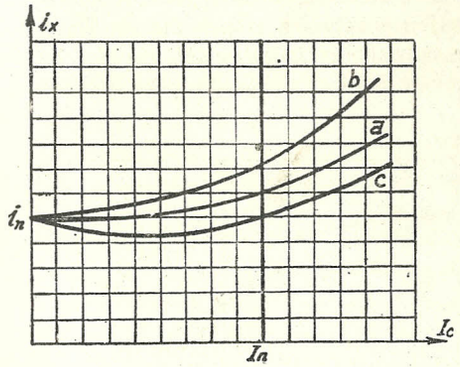

FIG. 107. — Curvas características de regulación o de campo de un alternador. La (a) corresponde al caso de carga óhmica; la (b) a carga inductiva y la (c) a carga capacitiva.

Por cada valor de la corriente de carga habrá entonces un valor necesario de la corriente de campo, para tensión en los bornes constante. Claro está que será distinta la regulación a efectuar si la carga es óhmica, inductiva o capacitiva. La figura 107 muestra las características de regulación para carga óhmica (a), carga inductiva (curva b) y capacitiva (c). Obsérvese que para carga óhmica hay que ir aumentando en cierto grado la corriente de campo, a medida que aumenta la carga, para mantener constante la tensión. Para carga inductiva ese aumento debe ser aún mayor como lo demuestra la curva b. Para carga capacitiva habrá que disminuir la excitación para compensar la supermagnetización producida por la reacción de la armadura.

Regulación de la tensión

La característica de regulación revela la necesidad de regular la tensión de los alternadores, lo que se conseguirá variando la f.e.m.i. En la expresión de esta última, sólo aparecen dos factores que se pueden variar a voluntad: el flujo y la velocidad.

Pero la velocidad de giro no se puede variar porque afectaría la frecuencia de la corriente producida. Queda entonces variar el flujo, es decir, la corriente de excitación.

La figura 108, muestra el esquema del alternador; R S T, son los bornes del inducido, ubicados en el estator y conectados a la línea de carga, sin intercalar dispositivo alguno de regulación. *G* es el generador de continua que produce la corriente necesaria para alimentar el inductor del alternador, ubicado en el rotor; esa corriente entra en los campos por las escobillas a y b que rozan sobre dos anillos conductores.

Para regular la corriente de excitación hay dos procedimientos: uno consiste en intercalar en serie con el circuito de campo al reóstato R_1 para provocar caídas de tensión, de modo de variar la tensión entre a y b, y con ello la corriente del inductor del alternador. El otro procedimiento consiste

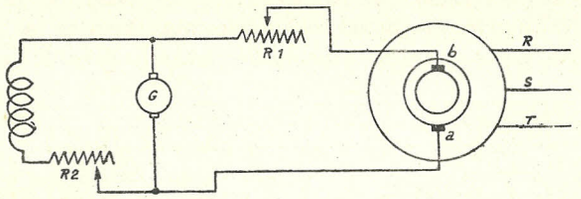

FIG. 108. — Esquema de conexiones para regular la tensión en el alternador.

en intercalar el reóstato R_2 en el circuito inductor de la dinamo excitatriz, con el que se varía la f.e.m. producida por la misma, consiguiéndose también variar la tensión entre a y b.

Los dos métodos se utilizan en la práctica, y a veces ambos a la vez. En este último caso R_1 sirve para regulación gruesa y R_2 para el ajuste fino. Todo esto es válido cuando la regulación es manual.

Los reguladores automáticos de la tensión actúan generalmente sobre el circuito de campo de la excitatriz, ya sea moviendo la manija de R_2 o cortocircuitando ese bobinado de campo a intervalos variables.

Este último procedimiento es el más moderno y consiste en regular los períodos de conexión en circuito normal y en cortocircuito del inductor de la excitatriz, en cada segundo.

PUESTA EN PARALELO DE ALTERNADORES

La condición para poner en paralelo dos generadores de corriente continua era que se cumpliesen la igualdad de tensiones y de polaridades. La polaridad se cuidaba al efectuar las conexiones a barras en la usina, de modo que una vez verificada la unión de polos positivos y negativos entre sí, se aseguraba cumplir siempre con ese requisito. Para realizar la conexión en paralelo sólo bastaba regular la tensión de la máquina que debía acoplarse, hasta igualar la de la máquina que ya estaba conectada.

En los alternadores esas dos condiciones no bastan, puesto que al ser variables las tensiones durante cada ciclo, puede suceder que se acoplen las dos máquinas en el instante que la tensión de una es máxima y la de la otra es cero.

Se tendrán entonces tres condiciones para la conexión en paralelo. La primera es que siendo dos alternadores trifásicos, la sucesión de fases sea igual en ambos. Esto corresponde a la igualdad de polaridad en corriente continua. Si se hacen las conexiones en la usina de forma que se cumpla ese

requisito no habrá que preocuparse más de ese detalle. La figura 109, muestra el esquema de conexiones para acoplar en paralelo dos alternadores.

La segunda condición es también similar al caso de máquinas de corriente continua, pues se establece la igualdad de tensiones en ambos alternadores. Si se conectan dos voltímetros como se ve en la figura y se regula la tensión de la excitatriz del alternador que se quiera acoplar hasta que la tensión indicada en su voltímetro sea igual o ligeramente superior a la indicada por la otra máquina, ese sería el momento de cerrar la llave de acoplamiento,

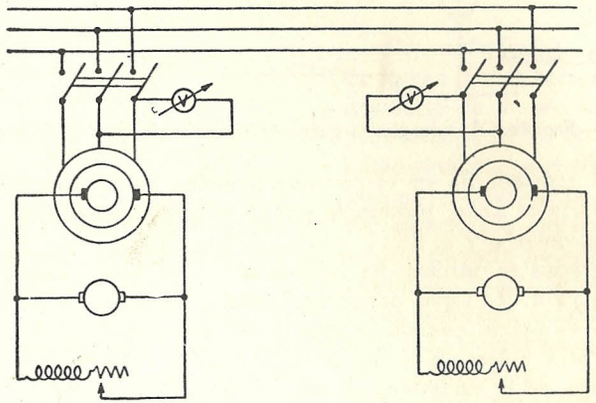

Fig. 109. — Esquema para la puesta en paralelo de dos alternadores.

pues la segunda condición está cumplida. Pero la maniobra no se puede hacer hasta verificar la tercer condición.

Para que se puedan unir entre sí los tres conductores de dos sistemas trifásicos es menester que coincidan la frecuencia y las fases de las tres tensiones; este conjunto equivale a la tercer condición citada. La frecuencia de cada alternador la indica el frecuencímetro conectado a ese efecto. Si observando el frecuencímetro de la que se quiere acoplar se comprueba que la indicación difiere de la otra máquina, habrá que regular la velocidad de la primera hasta tener lecturas coincidentes en los dos frecuencímetros. Hasta aquí se ha cumplido una parte de la tercer condición. Falta verificar que las tres tensiones estén en fase, o por lo menos verificar la tensión de una fase de cada máquina, pues es suficiente.

Si se conectan dos lámparas en serie y entre fases homólogas de los dos alternadores, como se ve en la figura 110, cuando las tensiones de esas dos fases coincidan en su fase las lámparas permanccerán apagadas. Si en cambio las dos tensiones están en oposición de fase las lámparas encenderán a pleno brillo, pues la tensión aplicada a la serie es el doble de la de fase, pero hay dos lámparas en serie.

Si las dos tensiones no están en fase ni en oposición de fase, sino que guardan un apartamiento angular entre 0 y 180 la tensión aplicada en las lámparas dependerá de ese apartamiento y encenderán con más o menos

brillo. El acoplamiento de los dos alternadores debe realizarse cuando las lámparadas están apagadas.

Si se conectan dos lámparas en la forma como se ve en la figura 110 b, entre fases distintas entre ambos alternadores, cuando las tensiones de una

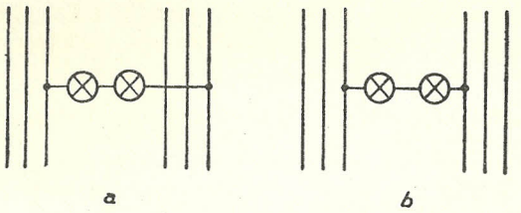

Fig. 110. — Lámparas indicadoras de puesta en paralelo. El esquema (a) es el de tensión cero o de lámparas apagadas y el (b) el de tensión máxima o de pleno brillo.

máquina estén en fase con las tres de la otra, las lámparas encenderán a pleno brillo. Los alternadores deben acoplarse pues, en el momento que las lámparas enciendan a pleno.

Los dos sistemas descriptos se pueden emplear siendo el a más preciso pero menos seguro que el b. Más preciso, porque es más fácil notar el momento en que las lámparas están totalmente apagadas que cuando las lámparas están en su máximo brillo. Y menos seguro porque si durante la operación se queman las lámparas, al no verse la luz podría suponerse que llegamos al punto de acoplamiento.

Un dispositivo que permite comprobar al mismo tiempo la igualdad de frecuencia y de fase, cuyas dos operaciones en conjunto se denomina sincronización, se ve en la figura 111. Seis lámparas se conectan en serie de a pares; un par entre fases homólogas y los otros dos pares restantes cruzados.

El conjunto se llama rosa de sincronismo, y se ve que se trata de una combinación de los dos sistemas ilustrados en las figuras 110 a y b. Si las tensiones del alternador que se desea acoplar no están en fase con las del que ya está conectado, las lámparas van encendiendo en forma cíclica y se observa que todo pasa como si un punto luminoso girara. La velocidad de giro está dada por la diferencia de frecuencia de las dos máquinas, y cuando se produce la igualdad de frecuencia y fase, la luz queda detenida, permaneciendo encendidas las cuatro lámparas inferiores.

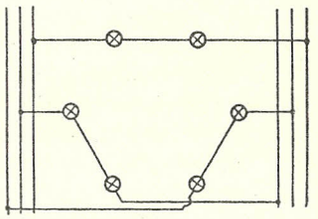

Fig. 111. — Rosa de sincronismo para la puesta en paralelo de dos alternadores.

La operación de sincronización descripta se hace en forma manual, pero hay sincronizadores automáticos que actúan simultáneamente sobre el reóstato de campo de cada excitatriz, sobre los reguladores de velocidad de los motores de impulso y sobre los interruptores generales de ambos alternadores.

CAPÍTULO VI

MOTORES SINCRÓNICOS

Estos motores, constructivamente, no difieren mucho de los alternadores, salvo en detalles como el espesor del entrehierro, algún devanado auxiliar para el arranque de los motores y otras cosas. Nos referiremos por lo tanto, a las mismas ilustraciones dadas en las páginas anteriores para evitar repeticiones.

Se denominan sincrónicos, porque la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la corriente de alimentación y del número de polos, siendo independiente de la carga que deba vencer. Esta velocidad está dada por la relación:

$$n = \frac{120\,f}{p}$$

es decir, por el cociente entre 120 veces la frecuencia y el número de polos del inductor.

De esta propiedad surge la limitación de uso de los motores sincrónicos, que se emplean cuando se requiere una velocidad absolutamente constante. Para los demás casos se prefieren los motores asincrónicos que, como se verá más adelante, son mucho más sencillos y generalizados.

Principio de funcionamiento

Veamos la figura 112. Coloquemos los mismos elementos que teníamos en la figura 94, para explicar el funcionamiento de un alternador y alimentemos la espira fija con la red de distribución de corriente alternada. En un instante determinado, durante medio ciclo de la corriente alternada, la corriente circulará en el sentido indicado por las flechas. Como la corriente es variable, también lo será el campo magnético producido por ella y entre este campo y el otro del rotor, se ejercerá una acción dinámica que tenderá a desplazar al rotor en un sentido que se obtiene aplicando la regla de la mano izquierda.

Regla de la mano izquierda, (ver figura 16).

Se aplica toda vez que se desee saber la dirección del desplazamiento que obrará sobre un conductor recorrido por una corriente y sometido a la acción de un campo magnético variable, o viceversa, entre una corriente variable y un campo constante. Poniendo la palma de la mano estirada de forma que enfrente perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo, y que estas últimas entren por la palma, y el pulgar separado totalmente de ella, si los dedos indican el sentido de circulación de la corriente, el pulgar señalará la dirección del desplazamiento del conductor.

En el caso de la figura 112, para la rama izquierda de la espira, colocaremos la palma en posición vertical, y vuelta hacia la derecha, de acuerdo con la polaridad Norte. Los dedos estirados deben señalar hacia afuera, pues ésa es la dirección de la corriente en el conductor; es decir, que la muñeca queda contra el papel y los dedos saliendo de él. El pulgar, en tal situación, indicará hacia abajo, es decir que el conductor tenderá a ser desplazado hacia abajo, pero como está fijo, el campo magnético será repelido hacia arriba, girando entonces el rotor en el sentido indicado en la figura.

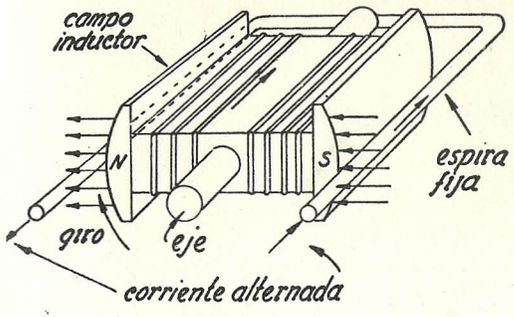

Fig. 112. — Principio de funcionamiento de un motor sincrónico.

Para la rama derecha de la espira se podría demostrar que el movimiento de giro coincide con el producido en la otra rama, aplicando la misma regla.

Después de transcurrido medio ciclo, la corriente en los conductores de la espira oambia de sentido de circulación, pero si en el mismo tiempo el rotor ha dado media vuelta, también se habrá producido una inversión en los sentidos de las líneas de fuerza, pues tendremos el polo Norte a la derecha y el Sur a la izquierda. Cambiando los sentidos de las corrientes y del campo al mismo tiempo, el movimiento permanece en el mismo sentido.

Esto dice que, para que un motor sincrónico comience a funcionar regularmente, se debe tener que el rotor gire a velocidad tal, que se produzca al mismo tiempo la inversión de la corriente y de la polaridad magnética en cada punto de la vuelta completa. Como cuando el rotor está detenido ello no es posible, estos motores requieren ser llevados a la velocidad "de sincronismo", que se dió en el párrafo anterior, mediante un motor o un dispositivo auxiliar.

Una vez que el rotor gira con esa velocidad, el funcionamiento se hace normal, la acción de repulsión entre el estator y el rotor suministra la fuerza necesaria para que el giro continúe y sólo se detendrá si se corta la corriente del rotor, del estator, o si la fuerza a vencer es mayor que la que puede suministrar el motor, en cuyo caso se dice que el mismo "desengancha", debiéndoselo hacer arrancar nuevamente si se quiere que siga funcionando.

En la práctica, ni el estator tiene una sola espira, ni el rotor un solo electroimán. El arranque se consigue con un motor auxiliar de potencia reducida o dotando al motor de un arrollamiento especial para que arranque como asincrónico, motor cuyo funcionamiento se verá más adelante. Otras veces, si se dispone de corriente continua, se hace trabajar a la excitatriz encargada de suministrar la corriente de los campos inductores, como motor de arranque, alimentándola con una fuente auxiliar de corriente continua. Cuando el rotor llega a la velocidad de sincronismo, se cambian las conexiones y se la conecta de la manera normal, restableciéndose el funcionamiento como motor sincrónico y como excitatriz, respectivamente.

Campo giratorio

Hasta aquí hemos considerado al motor sincrónico como una espira fija que formaba el estator, y un par de polos que forma el rotor. En la práctica, los motores sincrónicos son generalmente trifásicos, de manera que por lo menos tendrán tres bobinados iguales desplazados de 120° geométricos en la periferia del estator. La rueda polar o rotor tendrá tantos polos como los que tenga el bobinado del estator, según se verá más adelante.

A fin de comprender mejor el funcionamiento de los motores sincrónicos, nos referiremos al tipo de campo magnético formado por un devanado trifásico, repartido en la periferia del estator y alimentado por un sistema trifásico sinusoidal. de acuerdo a la figura 113, estando las tres sinusoides desplazadas de 120° entre sí, como corresponde.

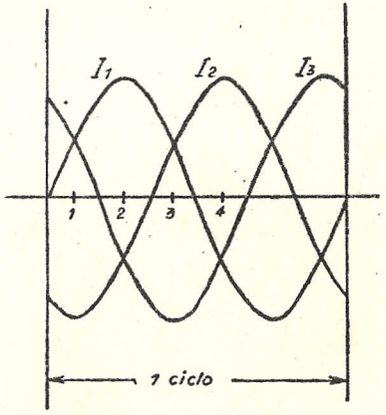

Fig. 113. — Sistema de tres corrientes de un conjunto trifásico.

En el estator colocaremos tres bobinados iguales, pero apartados de 120° geométricos, en la forma como se ve en la figura 114. Veremos cuánto vale y qué dirección tiene el flujo magnético resultante en el interior del estator. Para ello consideraremos algunas posiciones típicas, y las demás se deducirán por similitud.

En el interior del estator el flujo magnético resultante será la suma de los producidos por las tres bobinas, de manera que en cada instante habrá que sumar gráficamente los tres flujos de sus respectivas bobinas. Usamos para ello los diagramas vectoriales, pero aplicados a los flujos alternos. Pero debe hacerse una aclaración: el sentido de las líneas de fuerza de un campo magnético depende del sentido de circulación de la corriente que lo produce, tal como resulta de aplicar la regla práctica del tirabuzón. De manera que

si aplicamos el tirabuzón a las bobinas de nuestro estator, supongamos que cuando la corriente es positiva, o sea hacia arriba del eje en la figura 114, el flujo será saliente desde el centro geométrico del estator, y cuando la corriente es negativa, será entrante hacia ese centro O.

Tomemos la posición 1, que corresponde a un instante determinado. Las tres corrientes tienen valores que se pueden ver en la figura 113. I_1 e I_3 tienen la mitad del valor máximo, y son positivas, mientras que I_2 tiene su valor

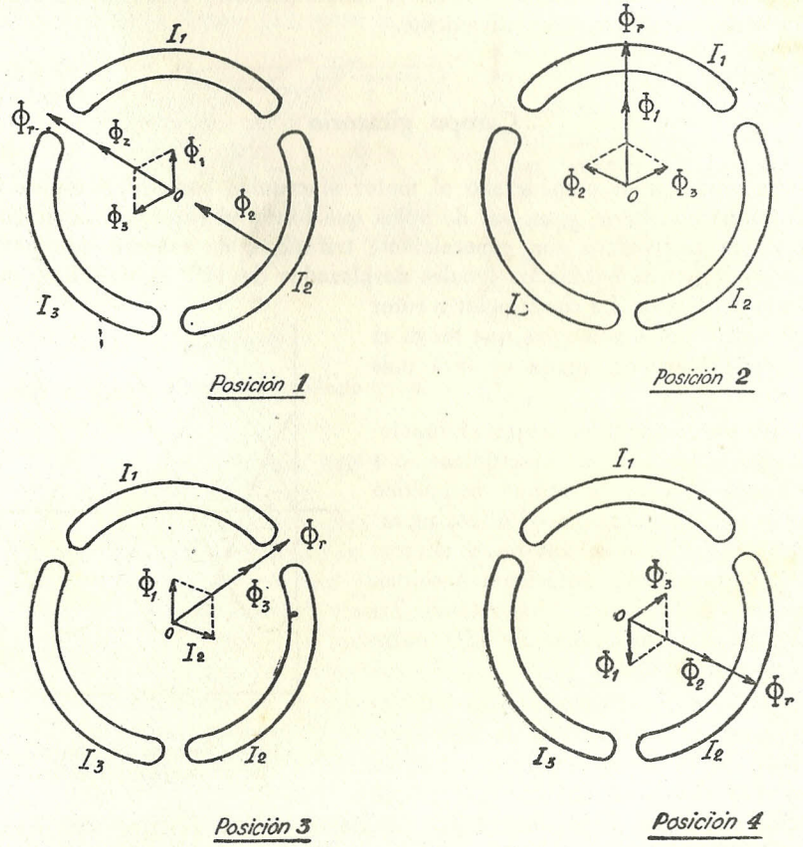

Fig. 114. — Principio de producción de un campo giratorio por un sistema trifásico de corrientes alimentando a tres bobinas aparadas geométricamente de ángulos de 120°.

máximo, pero es negativa. Llevemos esto al gráfico de los flujos de cada bobina. Los de las bobinas recorridas por I_1 e I_3 tendrán un valor dado, proporcional a esas corrientes, y estarán dirigidos hacia afuera desde O; el flujo producido por I_2 será doble de los otros y estará dirigido hacia adentro, es decir, hacia O, pero lo podemos dibujar saliendo de O en dirección opuesta

a su bobina. Sumemos ahora los tres flujos y vemos que da una resultante en la dirección del Φ_2, y con valor:

$$\Phi_r = 1{,}5\ \Phi_2$$

Y como el Nº 2 estaba en su valor máximo, se ve que el flujo resultante es 1,5 veces el valor máximo de cualquiera de las fases.

Pasemos ahora al instante 2, de la figura 113. Aquí la corriente I_1 tiene su valor máximo positivo, y su flujo deberá ser saliente de O, y hacia su bobina. Las otras dos corrientes tienen la mitad del valor máximo, pero negativo, y sus flujos deben converger hacia O, o también salir de O pero en dirección opuesta. En la figura 114 se ve esto igual al de la posición anterior, pero desplazado de un cierto ángulo en el sentido de las agujas del reloj.

Pasemos ahora a las posiciones siguientes, y se ve que si se procede en la misma forma, el flujo resultante de la posición 3 está dado por el mismo valor que en las otras posiciones, pero corrido más hacia adelante en el sentido del reloj. Y es evidente, pues la suma geométrica se hará con un flujo negativo y máximo, correspondiente a la corriente I_3, que será el único que sale de O en dirección opuesta a su bobina, y dos flujos de valor mitad del máximo, en dirección positiva, es decir, desde O hacia sus respectivas bobinas. Y para la posición 4 resulta también un flujo del mismo valor pero desplazado angularmente.

Si se hiciera esta operación para todas las posiciones o instantes durante un ciclo, se vería que siempre el flujo resultante en el interior del estator tiene un valor constante, pero se desplaza continuamente girando en un sentido determinado. Cambiando la sucesión de fases, gira en sentido contrario. Esto permite considerar a ese campo como equivalente al producido por una corriente continua, pero que girara continuamente en torno al estator. Por este motivo tal campo se llama: *giratorio*.

Y lo que sucede durante un ciclo se repetirá en los demás, de manera que con un sistema de tres corrientes alternadas defasadas eléctricamente, que recorren tres bobinas desplazadas geométricamente, se consigue un campo magnético que no es alternado sino constante en valor y signo, pero que gira con velocidad uniforme, dada por la conocida expresión:

$$n = \frac{120\ f}{p}$$

en revoluciones por minuto. Es evidente que el número de polos *p* debe intervenir, pues en la figura 114 hemos considerado un solo bobinado por fase, lo que da dos polos únicamente. Cuando hay más polos, se cumple un ciclo en menos de una vuelta. La frecuencia *f* de la red adonde se conecta el bobinado del estator también interviene, pues es la que da la velocidad de rotación de las fases, o también, la duración del período.

Volvamos ahora a nuestro motor sincrónico, y vemos que debemos colocar una rueda polar que tenga tantos polos como el bobinado del estator, para que a cada norte del estator corresponda uno en el rotor, y así sucesivamente.

Si hacemos girar el rotor hasta que coincida con la velocidad de sincro-

nismo se producirán los siguientes efectos: en el momento que un polo norte de la rueda polar está frente a un polo del devanado del estator que en ese momento tenga su cara norte hacia adentro, se produce un rechazo entre los dos polos nortes y la masa polar del rotor será atraída por la sección de bobinado estatórico que está colocado inmediatamente próximo en la periferia. Como debe haber igual cantidad de polos en el estator como en el rotor, esto mismo está sucediendo con todos los demás polos, uno de los cuales se ve en la figura 115, y como el campo giratorio gira en el sentido indicado por la flecha, el rotor girará en el mismo sentido. La fuerza que impulsa a girar al rotor está dada por la ley de atracción y repulsión de masas magnéticas, de modo que dependerá de la intensidad de los campos magnéticos de la rueda polar y del estator, o lo que es lo mismo, del flujo magnético del rotor y de la intensidad de corriente en el estator.

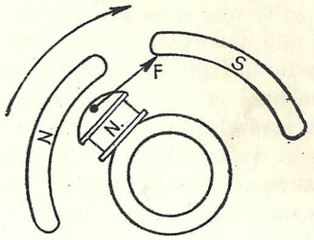

FIG. 115. — Principio de la acción de repulsión entre polos de igual nombre en el motor sincrónico.

Al eje del motor se aplica el mecanismo que éste debe mover, y que por lo tanto opondrá cierta resistencia al giro. Si la cupla que suministra el motor es mayor que la opuesta por la resistencia mecánica, el rotor girará con velocidad constante, cualquiera que sea esa resistencia puesto que la velocidad sincrónica depende de la frecuencia y número de polos, que son invariables y no de la carga.

Si la cupla resistente supera a la cupla motora el movimiento se frena, deteniéndose el rotor, lo que se llama *desenganche.*

Resumiendo, para poner en funcionamiento un motor sincrónico hay que provocar que la rueda polar enganche con el campo giratorio, para lo cual hay que hacerlo girar hasta alcanzar o sobrepasar la velocidad de sincronismo, dejándolo entonces libre. En esas condiciones el motor engancha y mantiene una velocidad constante igual a la sincrónica, mientras la resistencia opuesta al movimiento no sea tan grande que provoque el desenganche. Si esto sucediera hay que volver a realizar la maniobra de puesta en marcha. De estas consideraciones se deduce que los motores sincrónicos serán aplicables en aquellos casos en que se requiera una velocidad absolutamente constante, pues su mayor costo con respecto a otros motores de corriente alternada y el inconveniente de necesitar corriente continua para los campos restringe su campo de aplicación. Posteriormente veremos que a veces se lo utiliza por su cualidad de compensador del defasaje de la red.

Para las redes de 50 ciclos por segundo de frecuencia se construyen motores sincrónicos cuyo número de polos debe estar de acuerdo con la velocidad sincrónica deseada. La tabla adjunta da las velocidades respectivas, siendo p el número de polos y n_s la velocidad sincrónica dada en revoluciones por minuto. Si bien aparecen en la tabla valores altos de p, los mismos no son usuales, salvo aplicaciones especiales que escapan a los casos más comunes que se encuentran en la práctica.

Velocidades sincrónicas, para f = 50 c/s.

p	n_s	p	n_s
2	3000	22	272
4	1500	24	250
6	1000	26	231
8	750	28	214
10	600	30	200
12	500	32	187
14	428	34	176
16	374	36	166
18	333	38	158
20	300	40	150

Fuerza contra-electro-motriz

El comportamiento del motor sincrónico, en lo que respecta a sus magnitudes eléctricas y magnéticas, presenta cierta similitud con los alternadores. Al girar el rotor, el campo magnético del mismo barre los conductores del estator y se inducirá en el bobinado de este último la llamada f.c.e.m. La tensión a aplicar al motor debe ser suficiente para vencer la f.c.e.m. y las caídas internas; si representamos con V a la tensión aplicada e I a la corriente que toma de la red con atraso de fase φ, se puede hacer el siguiente diagrama vectorial: (figura 116).

En fase con I se descuenta a V la caída I R en la resistencia del bobinado del estator y perpendicularmente a I se descuenta la caída en la reactancia

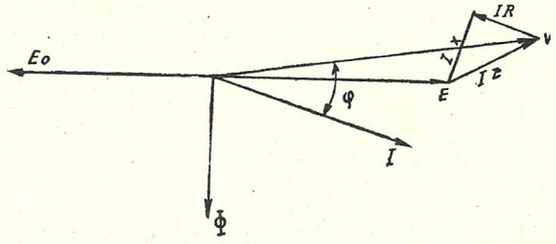

FIG. 116. — Diagrama vectorial de un motor sincrónico.

del mismo devanado; resulta que lo que queda disponible de la tensión aplicada es la fracción E necesaria para vencer o cubrir la fuerza contra-electromotriz E_o, igual y opuesta, producida por el giro del rotor o sea del flujo inductor. Si se varía el flujo del rotor debe variar la f.c.e.m. y como la tensión en los bornes se mantiene constante y la corriente I depende de la carga del motor, se produce la siguiente acción: ya que V es constante y las caídas también para una carga determinada, al variar E_o debe variar E, ya que

ambas deben ser iguales; por ello hay que modificar la posición del triángulo de caídas a fin de tener distintos valores de E.

La única forma de que ello suceda es que varíe la fase de la corriente I y entonces aparece la propiedad especial de los motores sincrónicos, de que regulando el flujo inductor o sea la corriente continua de la rueda polar se consigue variar el atraso de fase de la corriente de carga al extremo de que no sólo se la puede colocar en fase con la tensión, sino que hasta puede conseguirse que adelante con respecto a V.

Para comprender cómo sucede ésto, observemos la figura 117, en la que se representa parte del diagrama vectorial del motor. Los triángulos de caídas de tensión que se veían en la figura 116 están aquí tocando con un vértice en el extremo A. Tomemos un valor dado de la excitación, con la que se obtiene un valor de la f.c.e.m. como el OB, y vemos que para este estado de trabajo la corriente que toma de la red será I_1, en fase con la tensión. La caída en la resistencia será el cateto AG del triángulo que queda en la dirección AO, y cuya hipotenusa es la recta AB. Esta es la excitación necesaria para que el motor tome corriente en fase con la tensión o sea que se comporta como una carga resistitiva pura.

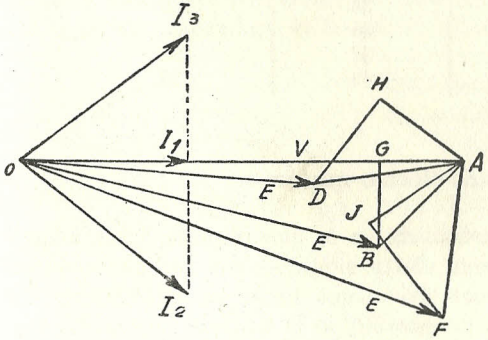

Fig. 117. — Diagrama que muestra el efecto de aumentar o disminuir el valor de la fuerza contra-electro-motriz, operando sobre la corriente de excitación.

Veamos lo que sucede cuando reducimos la corriente de excitación o de campo; para ese estado de trabajo no puede variar la potencia absorbida, de modo que se mantendrá constante la componente de la corriente que está en fase con la tensión. Pero el vector de la f.c.e.m., o mejor dicho, su opuesto E, se ha reducido, y lo tenemos en OD, con lo que el triángulo de caídas ha venido a ocupar una posición más empinada, siendo su hipotenusa el segmento AD. Y la corriente I_2 debe ser paralela al cateto AH que parte de A, notándose que esa corriente queda atrasada con respecto a la tensión en los bornes

Si en lugar de debilitar el campo inductor, lo reforzamos por aumento de la corriente de excitación, sucede que el vector opuesto a la f.c.e.m. aumentará, teniéndose el OF. Ahora el triángulo de caídas ocupa la posición tal que su hipotenusa ha venido a AF, y el cateto de caída óhmica es el AJ que parte del punto A. La corriente I_3 debe ser paralela a este último cateto, notándose en seguida que quedará en adelanto con respecto a la tensión aplicada. Se hace notar que los triángulos de caídas no tienen por qué tener iguales dimensiones, pues varía el valor de la corriente de carga, pero lo más importante es cómo se puede gobernar el ángulo de defasaje entre la corriente y la tensión, con aumentar o disminuir la corriente de excitación.

Características de motores sincrónicos

Siendo constante la velocidad desaparece en los motores la principal característica que tenían los de continua. Aparece otra de importancia extraordinaria llamada *característica de campo o curvas V*. Son las que representan las variaciones de la corriente de carga, cuando se regula la excitación.

En virtud de las consideraciones hechas sobre el diagrama vectorial, es evidente que se puede modificar la fase de la corriente de carga actuando sobre la de excitación. Si se conecta un amperímetro en el circuito de campo y otro en el de carga y se anotan las lecturas de ambos instrumentos cuando el motor gira en vacío, se obtiene la curva de P = O de la figura 118, es decir, la curva de potencia nula. Se nota que para cierta excitación llamada normal (i_n) el motor casi no toma corriente de la red. Si regulamos la excitación reduciéndola, comienza a tomar corriente atrasada aumentando I_c en la forma que se ve en las figuras.

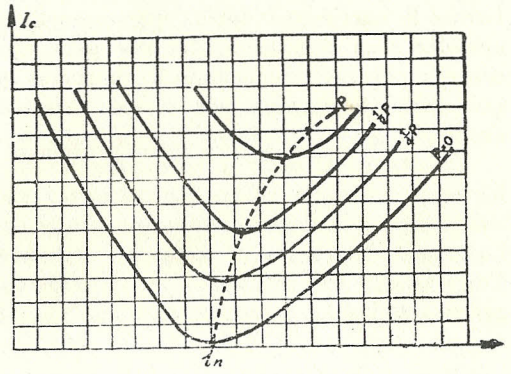

Fig. 118. — Características de campo o curvas V de un motor sincrónico.

Si en cambio sobreexcitamos, es decir, aumentamos la corriente de campo, el motor absorbe corriente de la red en aumento, pero adelantada en la fase con respecto a la tensión.

Si se conecta al eje una carga mecánica, que puede ser elegida como la cuarta parte, la mitad, las tres cuartas partes, o la máxima o normal del motor, se obtiene curvas similares a las de P = O que afectan todas la misma forma de la letra V, de ahí su nombre.

Quiere decir que en cualquier estado de carga del motor puede realizarse la regulación de fase como si estuviera en vacío, aunque no con tanta eficacia; de ello resulta que a veces se utilizan motores sincrónicos en vacío, con el único objeto de compensar el defasaje de la red. Tales motores trabajan sobreexcitados y se denominan *condensadores sincrónicos*.

La curva punteada de la figura 118, que pasa por los vértices de todas las curvas V, da los valores de la corriente de campo necesaria para que la carga sea óhmica a cualquier valor de I_c, es decir, para mantener la corriente que toma el motor de la red en fase con la tensión, a cualquier potencia desarrollada.

Partes de que se compone el motor sincrónico

Son, poco más o menos, las mismas que forman un alternador, por lo que remitimos al lector a las figuras 100 a 103, a fin de que pueda observar cada una de ellas.

La diferencia substancial, y es obvio insistir en ello, es que el alternador tiene su eje acoplado a la máquina propulsora y se recoge en la caja de bornes la corriente inducida que es enviada a la red, mientras que el motor sincrónico se conecta a una red para que tome de ella la corriente que necesita para su funcionamiento, mientras que a su eje se acopla la máquina que debe ser movida por él para efectuar cualquier trabajo a que está destinada.

El estator, el rotor y la carcasa no se diferencian fundamentalmente de los tipos ilustrados en las figuras mencionadas, aunque hay algunos motores sincrónicos que tienen el inductor fijo y el inducido móvil, encontrándoselos únicamente entre los de potencias reducidas, o en modelos experimentales. Por este motivo, omitiremos la descripción de ellos, suponiendo que en la práctica todos los motores son como los descriptos anteriormente.

CAPITULO VII

MOTORES ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS

Los motores asincrónicos, también llamados "de inducción", son los más generalizados en la industria que utiliza energía eléctrica como fuente de propulsión, por su sencillez de manejo y porque no necesitan fuente auxiliar de corriente continua, como los otros motores ya descriptos (motores sincrónicos). Su característica sobresaliente es que la velocidad no es la llamada "sincrónica", que tenían los motores de igual nombre, sino que es menor, y en grado que depende de la resistencia que debe vencer al girar. Esto quiere decir que en el arranque, y si el motor no tiene acoplado ningún mecanismo para ser accionado por él, el rotor puede alcanzar casi la velocidad de sincronismo, como veremos en seguida, y a medida que se le acopla una máquina que deba ser arrastrada en el movimiento giratorio, la velocidad irá disminuyendo, y tanto más cuanto mayor sea la resistencia a vencer, hasta un límite que es la potencia máxima del motor y pasado el cual se para.

Principio de funcionamiento

Supongamos que construimos un estator como el de un motor sincrónico, es decir con un paquete de palastro ranurado para alojar las espiras del bobinado y éste se reparte en tres secciones iguales para formar un sistema trifásico que será conectado a una red de igual tipo. Pero el rotor en lugar de estar formado por una rueda polar, ofrece el aspecto de una jaula de ardilla, de ahí su nombre; la figura 119 muestra las partes de un motor de inducción. Al conectar el estator a la red se producen los siguientes fenómenos:

En el estator se forma un campo magnético giratorio en igual forma que en los motores sincrónicos, campo que al girar barrerá los conductores del rotor que está detenido. Cualquier conductor que es cortado por un campo magnético da lugar a la inducción de una f.e.m., y como todas las barras del rotor están en cortocircuito, circulará por ellos intensa corriente.

Ello da lugar a la formación de un nuevo campo magnético propio del rotor. Como los conductores del rotor están dentro del campo del estator, se originará una acción dinámica que tenderá a oponerse a la causa que le da origen.

Esos conductores serán desplazados por una fuerza actuante y obligados a girar en el sentido que lo hace el campo del estator. Las fuerzas de repulsión que impulsan al rotor existirán mientras el campo giratorio corte a sus conductores y desaparecerían si el rotor girara a igual velocidad que dicho campo. Como el efecto de repulsión tiende a anularse por sí mismo, llevará

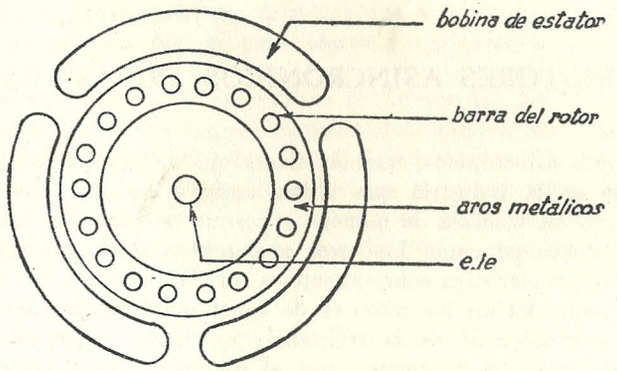

FIG. 119. — Elementos que constituyen un motor asincrónico o de inducción.

al rotor a la velocidad del campo giratorio o sea a la velocidad de sincronismo, pero como al llegar a ella dejan de ser cortados los conductores del rotor, desaparece el efecto motriz y el rotor pierde algo de velocidad. En cuanto esto sucede vuelve a aparecer la acción dinámica que lo impulsa a seguir al campo giratorio y se vuelve a producir el fenómeno.

De las consideraciones anteriores, parecería deducirse que la velocidad de giro del rotor sufre constantemente ascensos y descensos, pero en la práctica ello no sucede por la inercia que presenta la masa del rotor en movimiento, manteniéndose la velocidad constante para un determinado esfuerzo de giro que deba realizar el eje. Ese esfuerzo o cupla motora está dada por la resistencia que se opone al movimiento del mecanismo que se ha acoplado al eje del motor.

La acción dinámica entre un campo magnético y una corriente eléctrica es directamente proporcional al flujo y a la corriente, es decir:

$$M = k \Phi I$$

De aquí surge la dependencia entre la potencia del motor y sus dimensiones y la corriente que absorbe el estator, que es la que produce el flujo Φ. Para obtener grandes potencias hay que recurrir a devanados de estator hechos con alambre grueso y rotores con barras de gran sección.

Resbalamiento

El campo giratorio del estator gira con velocidad sincrónica dada por:

$$n_s = \frac{120\,f}{p}$$

En la que f es la frecuencia de la red y p el número de polos que se han formado con el devanado. Hemos visto que el rotor gira a una velocidad menor que la sincrónica que llamaremos n_r, o velocidad del rotor. La diferencia entre la velocidad sincrónica y la del rotor es la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor, es decir que, si suponemos al rotor fijo, el campo girará con respecto a él a la velocidad:

$$n = n_s - n_r$$

Se acostumbra a referir esa velocidad *n* a la sincrónica para expresar el porcentaje en que se atrasa el rotor con respecto al campo giratorio. A ese cociente se le llama *resbalamiento*:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

y se lo suele expresar en % multiplicando el resultado de la fórmula por 100.

El resbalamiento no es constante, pues aumenta con la carga que deba vencer el motor. Funcionando en vacío, es decir, no habiendo ningún dispositivo acoplado al eje, el resbalamiento toma valores muy pequeños que oscilan alrededor del 1 % o menos, dependiendo de las pérdidas mecánicas propias del motor.

A plena carga, o sea cuando el motor desarrolla su máxima potencia, el resbalamiento alcanza a valores de 3 a 4 %, para motores grandes y 5 a 6 % para pequeños.

Por ejemplo, un motor de inducción cuyo devanado del estator está formado por cuatro polos y se conecta a una red de 50 ciclos por segundo, tendrá la siguiente velocidad sincrónica del campo giratorio:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ r.p.m.}$$

y suponiendo el resbalamiento en un 5 %, la velocidad del rotor será:

$$s = 5\ \% = 0{,}05$$
$$n_r = n_s - s n_s = 1500 - 0{,}05 \times 1500$$
$$n_r = 1425 \text{ r.p.m.}$$

que es la velocidad especificada en las características del motor, pues siempre se da la velocidad a plena carga.

En forma similar, tendríamos que los motores de dos polos dan velocidades a plena carga, de 2850, pues 3000 es la sincrónica; los de seis polos

950 con 1000 r.p.m. como velocidad sincrónica, etcétera. Resumimos lo dicho en la tabla siguiente:

Número de polos p	Velocidad sincrónica r.p.m.	Velocidad con resbalamiento 5 %
2	3000	2850
4	1500	1425
6	1000	950
8	750	662
10	600	570
12	500	475

A distintos resbalamientos se determina la velocidad en la forma como se vió más arriba. En las características del motor que suministra la fábrica, se especifica la velocidad a plena carga.

Frecuencia en el rotor

En el momento de conectar el estator a la red se establece el campo giratorio y éste barre a los conductores del rotor. La corriente inducida en los mismos tendrá una frecuencia dada por:

$$f = \frac{p\, n_s}{120}$$

es decir, igual a la frecuencia de la red. Pero en cuanto el rotor se pone en marcha alcanza la velocidad n_r menor que la de sincronismo y el flujo giratorio con respecto al rotor se mueve a una velocidad dada por la diferencia entre ambos, que hemos llamado n. Luego la frecuencia en el rotor tomará el valor:

$$f_r = \frac{p\, n}{120} = \frac{p\,(n_s - n_r)}{120} = \frac{p\, n_s\,(n_s - n_r)}{120\, n_s} = f\, s$$

es decir, mucho menor que la de la red y dependiente de la carga.

El hecho de que la frecuencia en el rotor sea tan baja en marcha normal puede ser aprovechada con fines prácticos. Si se desea medir la velocidad del rotor, hay que disponer de un velocímetro, pero dicho aparato suele ser de una exactitud muy relativa dando mediciones con error de uno por ciento o más aún llegando a veces a un 5 %. Si se tiene en cuenta que el resbalamiento puede tener valores iguales al mencionado, es fácil prever que un velocímetro o taquímetro puede llegar a indicar como velocidad del rotor a la sincrónica, si el error es en exceso, o una velocidad 10 % menor si fuera en defecto, lo que hace inútil el valor leído.

Para poder determinar con precisión la velocidad del rotor se recurre

al siguiente procedimiento práctico: si se tocan las puntas de eje con dos terminales unidos a un miliamperímetro de imán permanente como se ve en la figura 120, el instrumento sufrirá desviaciones de su aguja debido a las corrientes parásitas que circulan por el eje del rotor, que son muy pequeñas pero que alcanzan para accionar al aparato, porque se lo conecta como vol-

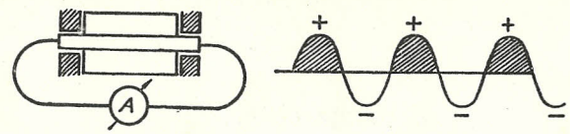

Fig. 120. — Forma de medir la frecuencia de las corrientes del rotor, contando los golpes de la aguja del miliamperímetro durante un minuto y dividiendo por 60.

tímetro. Como es de imán permanente, sólo indicará hacia adelante del cero los medios períodos positivos de la corriente alternada parásita, según se ve en la figura.

Contando el número de golpes que recibe la aguja en un minuto se puede calcular la velocidad del rotor, en virtud de la proporcionalidad directa que hay entre la frecuencia y la velocidad de giro, puesto que sabemos que:

$$f = \frac{p\, n}{120}$$

Y como el número de golpes de la aguja es 60 veces la frecuencia en el rotor, se tiene, si se divide por 60 (porque hemos contado los golpes por minuto) y siendo f la frecuencia de la red:

$$s = \frac{\text{Nº golpes}}{60\, f}$$

Y resulta ahora conocido el resbalamiento, en decimales, dado por el cociente entre la frecuencia medida y la de la red, que es conocida. Ahora, la velocidad real del rotor se calcula con la expresión

$$n_r = n_s - s n_s$$

Que puede ser modificada de la siguiente manera:

$$n_r = n_s\,(1 - s) = \frac{120\, f\,(1 - s)}{p}$$

Y queda expresada en función de cantidades conocidas. Si por ejemplo, la red es de 50 c/s, el motor es de 4 polos y hemos contado 75 golpes por minuto, se tiene:

$$s = \frac{75}{60 \times 50} = 0{,}025$$

$$n_r = \frac{120 \times 50\,(1 - 0{,}025)}{4} = 1462{,}5 \text{ r.p.m.}$$

Prácticamente, se puede determinar directamente la velocidad real de giro del rotor, descontando a la velocidad sincrónica el cociente entre el número de golpes y la mitad de polos, es decir:

$$n_r = n_s - \frac{N^o \text{ golpes}}{\frac{1}{2} p}$$

Corriente en el rotor

Es evidente que siendo mayor la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor cuando este último está detenido, o sea en el arranque, se producirán fenómenos de distinta magnitud. En marcha normal el rotor alcanza una velocidad cercana a la de sincronismo, o sea que difiere poco de la del campo giratorio; bajo estas condiciones de funcionamiento, la f.e.m.i. en el rotor y por ende la corriente en el mismo tendrá ciertos valores determinados. Pero en el momento de arranque, el campo giratorio se desplaza muy rápidamente con respecto al rotor, con que la f.e.m.i. en éste será muy elevada y también la corriente de circulación.

Al ser grande la corriente en el rotor, como la energía en éste procede de la red y es transferida por vía electromagnética, sucede que la corriente en el estator es mucho mayor que la normal, correspondiente a plena velocidad del rotor. De aquí surge la necesidad de emplear dispositivos que permitan reducir la corriente de arranque, pues si bien en motores pequeños no sería un inconveniente grave, en los grandes habría que dimensionar toda la instalación, incluso el bobinado, para esa fuerte corriente inicial.

A fin de conocer la relación que hay entre la corriente en el rotor cuando el motor arranca, con respecto a la que hay en marcha normal, veamos este tema con mayores detalles. Para ello, llamaremos E a la f.e.m. inducida en el rotor cuando el motor arranca, valor que será grande, dado que la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor también lo es. En estas condiciones, la corriente en el rotor la podemos suponer igual al cociente entre esa f.e.m. y la impedancia del rotor, o, como la inductancia de las barras será muy pequeña, directamente será el cociente entre esa f.e.m. y la resistencia del rotor:

$$I_a = \frac{E}{R}$$

Ahora bien, cuando el rotor alcanza su velocidad normal, a plena carga, la f.e.m. inducida en él se reduce, por haber disminuído la velocidad relativa entre él y el campo giratorio y precisamente se reduce en la proporción dada por el factor de resbalamiento. Es decir que ahora la corriente valdrá:

$$I = \frac{s\,E}{R}$$

Esta fórmula se puede escribir de otra manera, que nos servirá para hacer algunas apreciaciones de interés:

$$I = \frac{E}{\frac{R}{s}}$$

Ahora podemos decir que la corriente normal del motor es mucho menor que la de arranque, puesto que todo pasa como si la resistencia del mismo aumentara de valor al cobrar velocidad. Para tener en el arranque una corriente igual a la de marcha normal, habría que aumentar la resistencia del rotor, en ese momento, de su valor real R a otro mayor:

$$\frac{R}{s}$$

Y como *s* es del orden de 0,05 por ejemplo, se ve que la resistencia del rotor debería ser 20 veces mayor en el momento de arranque, cosa que no es posible en el tipo de rotor a jaula, pero que se puede hacer cuando el rotor se construye bobinado, como se verá más adelante.

La resistencia que se debe conectar en serie con el rotor para tener una corriente de arranque reducida, que en la práctica se limita a 1,5 veces la normal del motor, se calcula en la siguiente forma:

$$\frac{R}{s} = 1{,}5\ (R + R_a)$$

Donde hemos llamado R_a a la resistencia para arrancar, y cuyo valor se deduce inmediatamente:

$$R_a = R\left(\frac{1}{1{,}5\ s}\right) - 1$$

Métodos de arranque

Se ha visto que la corriente de arranque es muy superior a la normal de plena marcha, por lo que se la debe reducir. Los métodos empleados se clasifican en dos grupos, según se actúe en el estator o en el rotor. En el estator, puede conectarse una resistencia en serie, un autotransformador, o se arranca con conmutación estrella-triángulo, con conmutación de bobinado, etcétera.

En el rotor pueden intercalarse resistencias en serie o construirse en doble jaula. Describiremos a continuación los métodos más empleados.

Procedimiento sobre el estator - arranque estrella - triángulo.

Si se aplica a cada fase del bobinado del estator una tensión menor que la normal se reducirá la corriente de arranque. Supongamos que las tres fases del bobinado estén previstas para trabajar normalmente en conexión

triángulo; si el momento inicial se lo conecta en estrella según figura 121 a, a cada fase le tocará una tensión $\sqrt{3}$ veces menor. Una vez en marcha se pasa a la conexión normal que se ve en *b* de la misma figura.

El esquema de conexiones de la figura 122 permite ver la inversora tripolar que permite pasar de la conexión en estrella a conexión triángulo. Hay tipos de llaves automáticas de tres posiciones que realizan conjuntamente la función de interruptor general y de conmutador estrella-triángulo.

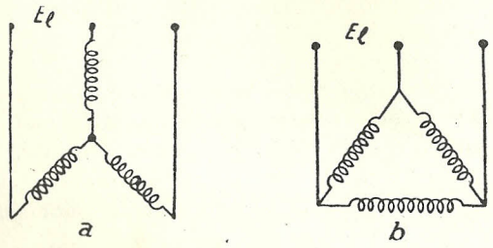

FIG. 121. — Principio de la conexión estrella y triángulo.

Arranque con resistencias en el estator.

Para reducir la corriente del estator en el arranque, puede recurrirse a la conexión de resistencias variables en serie con cada fase del mismo, pero el procedimiento es poco usado debido al bajo rendimiento que provocan las pérdidas de Joule en los reóstatos, por lo que se ha recurrido al método siguiente:

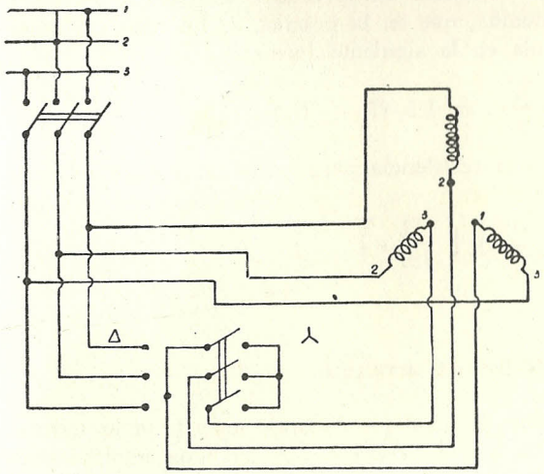

FIG. 122. — Esquema de conexiones para pasar de conexión estrella a triángulo en un golpe de llave.

Arranque con autotransformador en el estator.

En lugar de reóstatos, se coloca en cada fase del estator un autotransformador con derivaciones en sus bobinados, unidas a topes de una manivela de contactos, según se ve en la figura 123. Cuando las tres manivelas están en la posición marcada *a* en la figura, la tensión aplicada a cada fase del estator es nula y es la posición de arranque

Corriendo las manivelas hacia la posición *b* se va aplicando cada vez más tensión al estator hasta que llegando a dicho punto se alcanza la tensión normal de la red.

En marcha normal pueden desconectarse los autotransformadores utilizando un interruptor adicional a dicho efecto, que no está indicado en la figura.

El procedimiento de arranque estrella-triángulo sólo se puede aplicar en los casos en que la potencia sea reducida, menor de 10 HP y además se requiere

que el motor trabaje normalmente en triángulo para poder conectarlo en estrella en el arranque, pues si su conexión es en estrella no es posible aplicar este sistema. No utilizándose el de reóstato en serie con el estator se recurre al empleo de autotransformadores de arranque, lo que puede hacerse con motores de mayor potencia.

Arranque con conmutación de devanados.

Puede construirse al estator de manera que cada fase de su bobinado esté dividido en dos secciones iguales que normalmente se prevén para trabajar en paralelo. Utilizando un conmutador especial pueden conectarse esas sec-

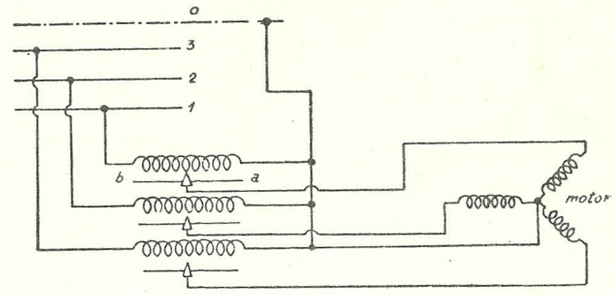

FIG. 123. — Esquema de conexiones de un sistema de arranque con autotransformador conectado en el estator del motor de inducción.

ciones en cuatro formas distintas, que se ven en la figura 124 y que cada una de las cuales va permitiendo mayor corriente de circulación.

La posición *a* es la inicial de arranque en la cual las dos secciones de cada fase están en serie, formando un sistema trifásico, estrella. La posición *b* forma un sistema mixto estrella-triángulo, que permite mayor corriente de circulación. La posición *c* permite hacer una conexión triángulo serie y la final que es la *d*, conectada en estrella-paralelo. Se dispone así de cuatro golpes para el arranque sin intervención de dispositivos auxiliares, pero el motor debe estar previsto en su construcción para aplicar tal sistema.

Procedimientos en el rotor.

Cualquiera de los métodos aplicados en el estator limitan la cupla de arranque, por lo que para los casos en que sea necesaria la cupla máxima no son aplicables. Se recurre entonces al procedimiento sobre el rotor. El más utilizado es el que consiste en aumentar la resistencia del rotor durante el arranque, para reducir la intensidad; para aumentar la resistencia se pueden conectar reóstatos en serie, lo que exige que el rotor sea bobinado en lugar del tipo jaula. Se puede hacer bifásico o trifásico, pero siempre con el mismo número de polos que en el estator. La figura 125, muestra el esquema correspondiente a un rotor con bobinado trifásico conectado en estrella como es común. Los tres extremos libres de las fases se unen a tres anillos aislados solidarios con el eje. Sobre estos anillos rozan tres escobillas que se unen a

los tres extremos de un reóstato trifásico conectado en estrella. Con los cursores a la derecha, la resistencia intercalada en serie es la máxima y corresponde a la posición de arranque. Corriendo los cursores hacia la izquierda se va disminuyendo la resistencia intercalada hasta anularla completamente, quedando el rotor en cortocircuito, que es su conexión normal. El valor de estas resistencias ya lo hemos calculado antes.

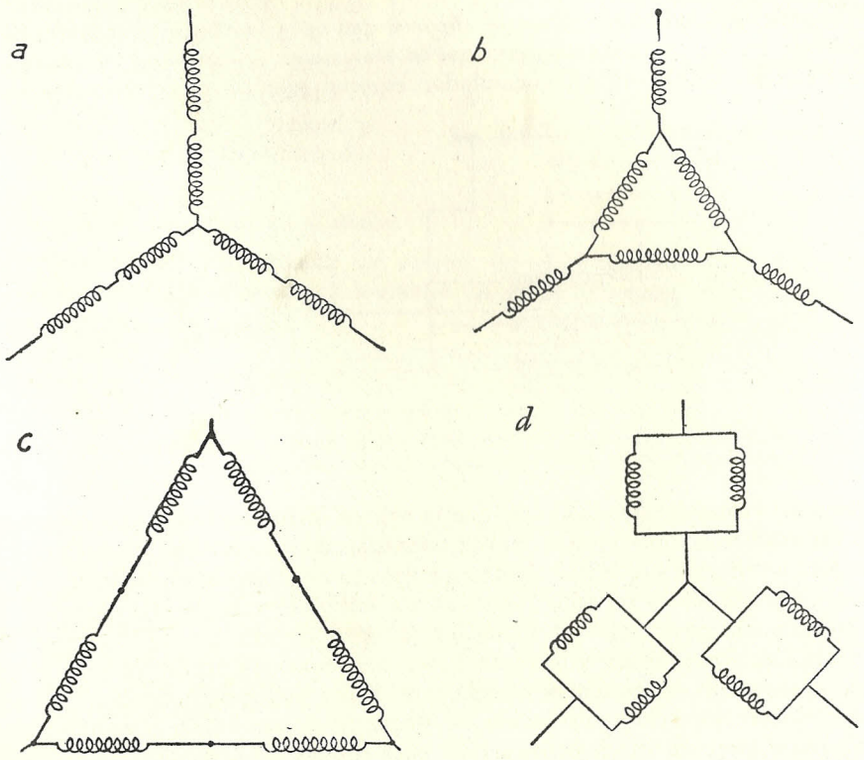

FIG. 124. — Esquema que muestra las distintas conmutaciones en el bobinado del estator de un motor asincrónico, en el sistema de arranque de tal tipo.

Como la tensión inducida en el rotor es reducida, la aislación del reóstato no requiere preocupaciones especiales. Generalmente estos motores están provistos de una palanca especial que levanta las escobillas y coloca una barra que hace cortocircuito directo sobre los anillos, para evitar desgaste de las escobillas durante funcionamiento normal.

Algunos motores que utilizan este sistema tienen el reóstato en el rotor y un juego de tres palancas sostenidas por resortes y provistas de un contrapeso. Cuando el motor arranca, la fuerza centrífuga hace alejar a las palancas a medida que aumenta la velocidad; en marcha normal la fuerza centrífuga ha

logrado vencer totalmente a los resortes y el reóstato queda completamente en cortocircuito. Estos motores se denominan de *arranque centrífugo*.

Rotores con doble jaula.

Para evitar la construcción de rotores bobinados, se los puede hacer con dos jaulas concéntricas; la exterior tiene alta resistencia y baja reactancia y la interior a la inversa.

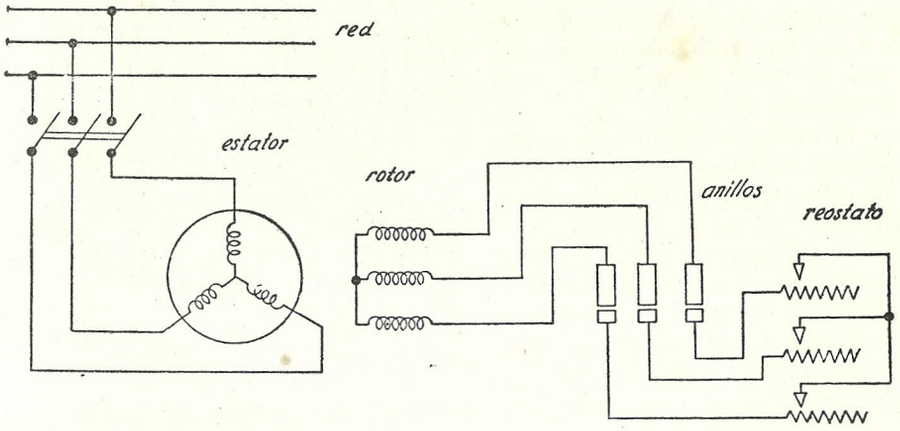

FIG. 125. — Esquema del sistema de arranque con resistencia en serie con el bobinado del rotor.

En el arranque, la frecuencia del rotor es alta, por lo que la reactancia de la jaula interior no deja pasar al flujo magnético, el cual debe circular por el espacio comprendido entre las dos jaulas. Como la jaula exterior tiene alta resistencia porque se la construye de hierro, la corriente de arranque es reducida.

En marcha normal baja la frecuencia del rotor y el flujo puede atravesar la jaula interna que, como es de baja resistencia permite restablecer el funcionamiento normal.

Partes de que se compone un motor de inducción

El motor asincrónico es, en lo que se refiere al número y tipo de partes componentes, el más sencillo de cuantos se emplean en la industria, sobre todo si se trata de los de pequeña potencia que baten el "record" de simplicidad.

Las dos partes fundamentales en que se puede separar el motor son: el estator y el rotor, teniendo cada una de ellas a su vez, algunos componentes que describiremos a continuación.

Estator.

Tiene mucha similitud con el de los motores sincrónicos y los alternadores, vistos en capítulos anteriores, y se componen de carcasa, núcleo y bobinado.

La carcasa es la envoltura exterior que sirve de sostén a los otros dos elementos y al motor mismo, pues está provista de los pies de apoyo. Además, tiene la caja de bornes para la conexión del motor a la red. La figura 126 ilustra una carcasa de motor de inducción, comprendiendo el núcleo.

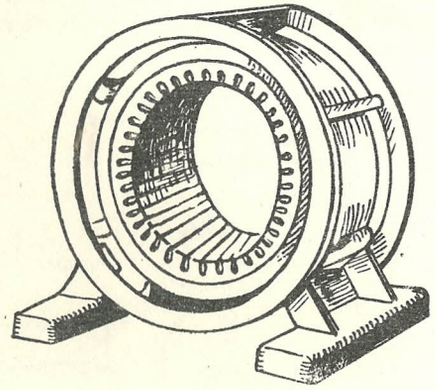

Fig. 126. — Vista del estator de un motor asincrónico o de inducción.

El núcleo está compuesto por un paquete de chapas de palastro, aisladas entre sí con papel de seda u óxido del mismo metal que forma la chapa, y con una serie de ranuras longitudinales para alojar el bobinado.

Obsérvese la similitud entre la ilustración de la figura 126 y la de la figura 100, que pertenecía a un alternador o a un motor sincrónico, y se justificará lo dicho más arriba.

Rotor.

Es aquí donde desaparece todo paralelo entre motores sincrónicos y asincrónicos, pues mientras los primeros tenían una rueda polar alimentada con corriente continua, con masas polares salientes y devanados cilíndricos, en los asincrónicos no existe nada de eso sino que se trata de un rotor liso, similar al de las máquinas de corriente continua, con ranuras para alojar los conductores y con anillos rozantes o no, según se ha visto. Estos conductores forman un bobinado que será estudiado más adelante, como devanado del rotor.

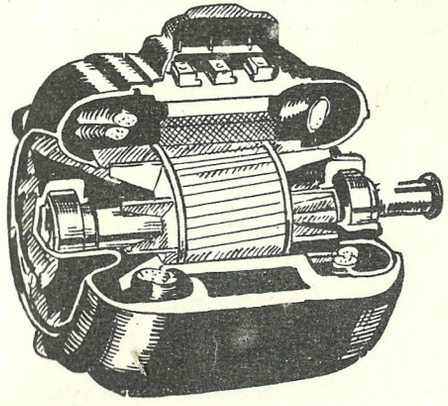

Fig. 127. — Vista de un rotor colocado de motor asincrónico.

En los motores pequeños de potencia reducida, el bobinado del rotor es simplemente una serie de barras conductoras paralelas y puestas en cortocircuito en ambos extremos por aros metálicos. Las barras se alojan

en las ranuras del núcleo del rotor. La construcción moderna las hace de fundición de aluminio, introducido a presión en dichas ranuras y formándose en la misma operación los dos aros extremos. En esta forma, se abarata la construcción del rotor y su peso, reduciendo las fuerzas de inercia. El aspecto de un rotor de esta naturaleza se puede ver en la figura 127, notándose que las ranuras tienen cierta inclinación longitudinal, y que el mismo rotor está provisto de aletas de ventilación.

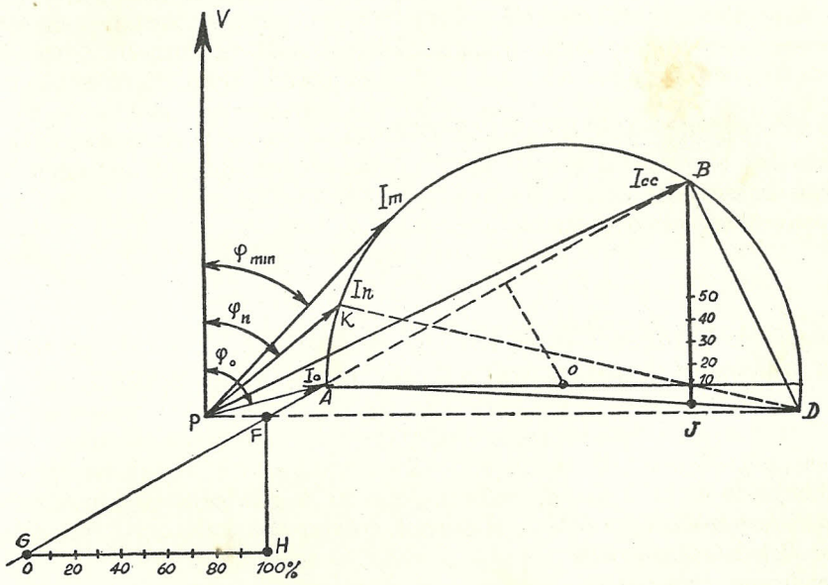

Fig. 128. — Diagrama circular de Heyland para motores de inducción.

Diagrama circular de Heyland

El diagrama vectorial de un motor asincrónico permite estudiar y obtener todas sus características. En él aparecen la tensión de la red V, la corriente que toma el motor en vacío I_o, la corriente de una carga cualquiera I_n, la corriente en cortocircuito I_{cc}, etcétera.

La figura 128 muestra tal diagrama vectorial para cuyo trazado se procede en la siguiente forma: conectando el motor en vacío, es decir de modo que no tenga nada acoplado al eje, se procede a medir la corriente, la tensión y la potencia I_o, V y W_o. El ángulo de fase en vacío. φ_o se obtiene mediante la expresión conocida:

$$\cos \varphi_o = \frac{W_o}{\sqrt{3}\, I_o\, V}$$

Para poder obtener el círculo cuya ingeniosa utilidad se debe a Heyland, habría que obtener otro punto del mismo, pues el *A* de la figura ya lo tenemos con solo dibujar los vectores V y I_o.

Pero si se toma una corriente cualquiera menor que la máxima del motor el círculo resultará muy impreciso, por lo que se prefiere determinar el punto *B* dado por la corriente en cortocircuito; aclaremos esto: si se mantiene frenado el rotor y se aplicara la tensión normal al estator, circularía por éste la corriente que hemos llamado de arranque y que ahora denominamos corriente de cortocircuito. Como no es posible obtenerla directamente se recurre a un artificio: se aplica al motor una tensión reducida *e* tal que el amperímetro indique la corriente normal a plena carga (figura 129), y luego se calcula la corriente en cortocircuito con la expresión:

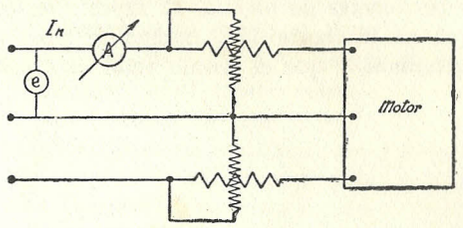

FIG. 129. — Esquema de conexiones para medir la corriente de cortocircuito

$$I_{cc} = \frac{I_n \, V}{e}$$

El ángulo de la corriente en cortocircuito se determina conectando un watímetro trifásico en el cual leemos W_n y aplicando la fórmula tenemos:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{W_n}{\sqrt{3}\, I_n \, e}$$

Dibujando en la figura el vector I_{cc}, con un ángulo correspondiente respecto de la tensión V, se obtiene el punto B que pertenece al círculo. Uniendo A con B y levantando una perpendicular en su punto medio se tiene que la misma cortará a la horizontal que pasa por A en el punto O centro del círculo.

La corriente que absorbe el estator a cualquier carga acoplada al eje está dada por vectores que parten de P y llegan hasta el círculo; uno de esos vectores sería la corriente normal de plena carga del motor I_n y el ángulo que forma con el vector V es el de defasaje normal del motor φ_n. Se ve en la figura que el mínimo defasaje posible es el ángulo φ_{min}, el cual se obtiene para una corriente absorbida I_m que es mayor que la normal.

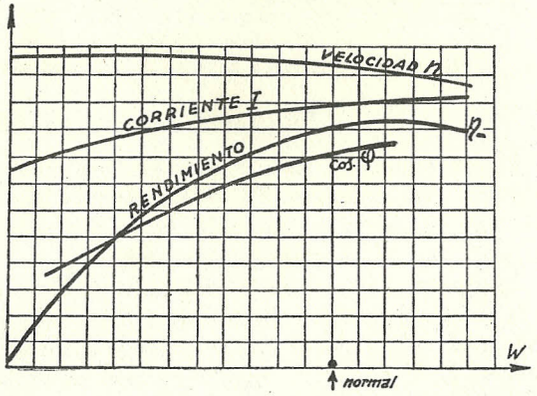

FIG. 130. — Curvas características de un motor asincrónico. Dan la corriente, la velocidad, el rendimiento y el factor de potencia a distintos estados de carga.

Veamos cómo se puede aprovechar el diagrama circular. Trazamos una horizontal por el punto P hasta cortar el círculo en D. Unimos D con A y con B; en la primera de esas rectas obtenemos el punto J sobre una vertical bajada desde B. La recta B J se divide en cien partes iguales obteniéndose la escala en la cual se medirán los resbalamientos dados en por ciento.

La recta B A se prolonga hacia el otro lado del eje hasta un punto arbitrario G. El punto F es el de corte entre las rectas B G y P D. Desde F se baja la perpendicular F H de modo que se tenga una recta G H que sea horizontal. Esa recta se la divide en cien partes iguales, obteniéndose la escala en la cual se leerán los rendimientos del motor en por ciento.

Veamos un ejemplo de utilización de las escalas. Supongamos al motor trabajando con una cierta carga para la cual nos interesa conocer el rendimiento y el resbalamiento. Medimos la intensidad del estator por fase y su defasaje con respecto a la tensión aplicada V. Sea la corriente I_n indicada en la figura, dada por el vector P K. Uniendo K con D con una recta, se lee en la escala de s el resbalamiento. Uniendo K con F y prolongando esa recta hasta cortar G H podemos leer el rendimiento.

Características de los motores asincrónicos

Del diagrama de Heyland se pueden obtener casi todas las características de los motores asincrónicos, que están ilustradas en la figura 130; se acostumbra a dar las variaciones que experimenta la velocidad del rotor, el rendimiento del motor, el coseno φ y la corriente del estator, para distintos valores de la potencia absorbida o de carga.

En las curvas notamos que la corriente de plena carga normal no es mucho más grande que la corriente de vacío I_o siendo ésta una característica destacada de los motores de inducción. Se ve también que el rendimiento y el cos φ disminuyen mucho a cargas reducidas, por lo que se aconseja instalar estos motores de modo que siempre trabajen con su potencia máxima o cerca de ella.

La variación de la velocidad con la carga es muy semejante a la de los motores derivación de corriente continua, presentando una caída de velocidad con la carga, lo que no sucedía en los motores sincrónicos.

CAPITULO VIII

MOTORES ASINCRÓNICOS MONOFÁSICOS

Dentro del tipo de motores de inducción, que fueron descriptos en el capítulo anterior, se encuentran los motores monofásicos con rotor en cortocircuito, igual que los trifásicos, pero con algunas diferencias constructivas y de funcionamiento que conviene describir.

Los motores asincrónicos monofásicos se construyen únicamente para pequeñas potencias, en los casos de utilización de redes normales trifásicas. Para redes monofásicas, escasas por cierto, no queda otro recurso que hacer los motores grandes del tipo monofásico, pese a su menor rendimiento y mayor costo y peso a igual potencia. A propósito de esto, veremos más adelante algunos ejemplos de transformación de motores trifásicos en monofásicos y viceversa, que son algo frecuentes en la práctica.

Otros tipos de motores que encuadran en este título general son los llamados a "repulsión-inducción", que funcionan durante el arranque como motores de repulsión, cuyo estudio se verá más adelante y que, después de llegar a la velocidad normal, pasan a funcionar como motores de inducción comunes mediante ingeniosos dispositivos.

Los motores tipo serie para corriente alternada o para ambas corrientes, estos últimos llamados "universales" y los de repulsión propiamente dichos, se verán en el capítulo próximo.

Principio de funcionamiento

El giro del rotor se produce merced al campo giratorio, en forma similar a los motores asincrónicos trifásicos, pero con la diferencia que en estos últimos dicha propiedad se manifestaba aún en reposo, por lo que el arranque era automático, sin necesitar dispositivos para iniciar el movimiento. En los monofásicos, se puede explicar el funcionamiento si se imagina que el rotor ha sido impulsado para comenzar a moverse, produciéndose entonces las accio-

nes dinámicas que se verán en seguida. Tal impulso inicial puede hacerse a mano o con ayuda de fuerzas auxiliares, producidas ex profeso mediante una serie de dispositivos que se verán más adelante.

La figura 131 representa la mínima expresión de un motor asincrónico monofásico, formado por una espira abierta, fija, que se conecta a la fuente de corriente alternada y otra espira que puede girar alrededor de su eje, y que está cerrada en cortocircuito.

Supongamos que se le da un envión a la espira cerrada o "rotor" y que comienza a girar. La espira fija o "estator" está recorrida por una corriente alternada proveniente de la red, y se formará entonces dentro de ella un campo magnético, también alternado, que llenará el espacio abarcado por la espira misma, es decir que el rotor estará contenido en dicho campo.

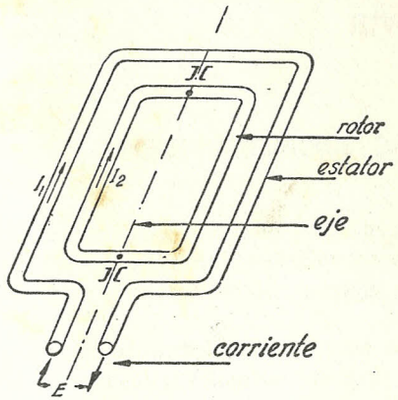

FIG. 131. — Principio de funcionamiento del motor monofásico.

Tenemos ahora un campo magnético alternado y una espira moviéndose dentro de él; al cortar líneas de fuerza del campo, se inducirá una corriente en el conductor, cuyo valor depende de la velocidad del corte, de modo que si la espira interna gira muy ligero, tanto como para que dé vuelta en el tiempo en que se produce la inversión de polaridad magnética debida a que la corriente en el estator es alternada, no habrá inducción de corriente en el rotor. La velocidad que hace que el rotor dé una vuelta durante el tiempo que deja transcurrir un ciclo completo de la corriente alternada, se llama velocidad sincrónica y está dicho que el rotor no la puede alcanzar, pues cesaría la producción de corriente en él.

El rotor gira entonces a velocidad menor que la de sincronismo, y se induce corriente en sus conductores, tanto mayor cuanto menor es su velocidad. Tenemos ahora dos corrientes: la del estator y la del rotor, entre las que se ejercerá una acción dinámica de repulsión que mantendrá girando al rotor mientras no se lo frene con cupla mayor que la que se produce por dicha acción.

Supongamos que el rotor se detiene y que se le da un impulso en sentido contrario al que se le dió antes. El campo magnético del estator persiste, y al igual que antes cambia de polaridad magnética junto con el cambio de sentido de la corriente alternada que recorre el estator. Durante un ciclo tendremos que el campo permanece la mitad del tiempo con un sentido, pero variando sus valores instantáneos desde cero hasta un máximo, para volver a cero, y la otra mitad del tiempo pasa lo mismo pero en la otra dirección, es decir, opuesta a la primera.

Lo mismo que antes, decimos que si la velocidad de la espira es tal que da media vuelta durante medio ciclo de la corriente o del campo magnético, de modo que al invertirse el sentido de éste se cambia también el conductor

de la derecha por el de la izquierda del rotor, no habrá corte de líneas de fuerza por los conductores del rotor, no habrá corriente inducida en el mismo y no se producirá cupla motora alguna.

Pero si la velocidad del rotor es algo menor que la que hemos llamado de sincronismo, es decir que el cambio de posición de los conductores en la media vuelta no coincide con el cambio de polaridad magnética, se producirá corte de líneas de fuerza por los conductores del rotor, inducción de corriente en el mismo y acción de repulsión entre las dos corrientes: la del rotor y la del estator, con lo que el rotor girará en el sentido en que se le dió el impulso, con velocidad menor que la de sincronismo y proporcionando una cupla que puede realizar un trabajo útil, mientras la resistencia opuesta no sea mayor que ella.

De lo dicho se desprende que el motor asincrónico monofásico mantiene el sentido de giro que coincide con el impulso inicial, y que estando detenido no puede arrancar por sí mismo. Para que empiece a funcionar basta dar un tirón a la correa o pequeño giro a la polea en el sentido que se desee que mantenga la rotación.

En realidad, estudiando el problema más profundamente se ve que en el rotor se inducen dos corrientes que se superponen: una, que es la que se describió, y cuya frecuencia es la diferencia entre la frecuencia de la red y la que corresponde a la velocidad del rotor y otra, debida al campo giratorio de sentido contrario, pues puede suponerse el cambio de polaridad magnética en los dos sentidos, y cuya frecuencia será la suma de las dos referidas.

La velocidad de sincronismo está dada por la relación:

$$n_s = f_r = \frac{120\,f}{p}$$

en la que f es la frecuencia de la red y p el número de polos del estator. Para el motor de la figura 131, puramente esquemático, el número de polos es dos, de modo que si la frecuencia de la red de 50 períodos por segundo, la velocidad sincrónica es de 3.000 revoluciones por minuto.

La frecuencia de las corrientes del rotor, debidas al campo giratorio directo, por así llamarlo. está dada por:

$$f_r = \frac{(n_s - n)\,p}{120}$$

siendo n la velocidad del rotor en r.p.m. y p el número de polos. Así, si el rotor gira a razón de 2.880 r.p.m. y el estator es de dos polos ($n_s = 3.000$ y $p = 2$), se tiene que la frecuencia de las corrientes del rotor es:

$$f_r = \frac{(3000 - 2880) \times 2}{120} = 2 \text{ ciclos por segundo}$$

La frecuencia de la otra corriente del rotor, debida al campo giratorio inverso, está dada por la expresión de más arriba, pero en la que se coloca

signo de suma dentro del paréntesis, con lo que para el ejemplo citado se tendrá que vale:

$$\frac{(3000 + 2880) \times 2}{120} = 98 \text{ ciclos por segundo}$$

obsérvese que la suma de las dos frecuencias del rotor da siempre el doble de la frecuencia del estator, lo que le permite conocer una de ellas en función de la otra.

La consecuencia inmediata de esto es que el rotor del motor asincrónico monofásico tiene mayores pérdidas en el cobre por el efecto Joule que el motor trifásico del mismo tipo. Además, el factor de potencia que da el defasaje entre la corriente que absorbe y la tensión de la red es menor en el monofásico que en el trifásico. También es menor su rendimiento, por tener mayores pérdidas en el cobre y porque como el rotor tiene corrientes de frecuencia elevada, se producirán mayores pérdidas en el núcleo de hierro del mismo.

Partes componentes del motor asincrónico monofásico

Estos motores, al igual que los trifásicos de igual designación, están formados por el estator y por el rotor, con algunos dispositivos auxiliares para el arranque y la regulación de velocidad que se verán oportunamente.

Estator.

Está formado por un conjunto de chapas de hierro, aisladas entre sí formando un paquete, con una serie de ranuras longitudinales para alojar a los conductores que formarán el devanado. Las chapas constituyen el núcleo, que puede verse en la figura 132, y que está sujeto a la carcasa, también de hierro, pero de una sola pieza.

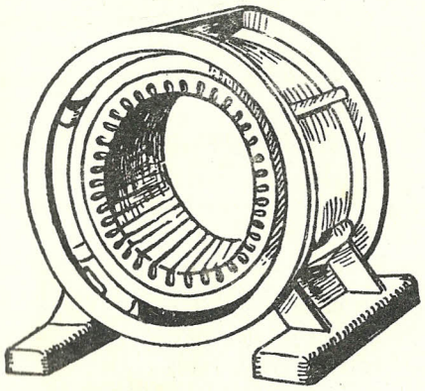

Fig. 132. — Vista del estator de un motor monofásico.

En un costado o en la parte superior de la carcasa se encuentra la caja de bornes, con los terminales para conectar el motor a la red. A veces hay más de dos bornes, cuando se incluye la conexión del dispositivo de arranque o la conmutación del bobinado para trabajar en dos tensiones distintas. Es el caso de los motores fabricados para 110 y 220 Volt, para lo que basta tomar las dos partes en que se ha dividido al devanado en serie o en paralelo.

La base de la carcasa está dotada de pies con perforaciones para asegurar el motor a su fundación mediante bulones. Como la mayor parte de los motores monofásicos de inducción son de potencia reducida, los mismos son de pequeño tamaño, y la fundación se suprime o se la substituye por una ménsula, una placa o sino el motor se aplica directamente sobre la máquina que debe impulsar.

Rotor.

En los motores de potencia importante, que se usan sólo donde se dispone de redes monofásicas, porque en caso contrario se prefieren los motores trifásicos, el rotor se hace bobinado, casi siempre en sistema trifásico, y se conecta a tres anillos rozantes para intercalar el reóstato de arranque o de regulación de velocidad (ver el capítulo anterior).

La figura 133 da el esquema a seguir en tales casos, en el que pueden verse las tres fases del bobinado del rotor (aunque el estator tenga un devanado monofásico), que se conectan en estrella, uniendo entre sí sus tres extremos y a tres anillos los otros extremos de cada fase. Los tres anillos rozan continuamente con tres escobillas que están conectadas a un reóstato de tres ramas, conectado también en estrella, y que en la posición inicial está totalmente intercalado, para arrancar el motor. A medida que va cobrando velocidad se va eliminando la resistencia hasta que finalmente queda el rotor en cortocircuito, que es la posición de funcionamiento normal, como se vió al principio del capítulo.

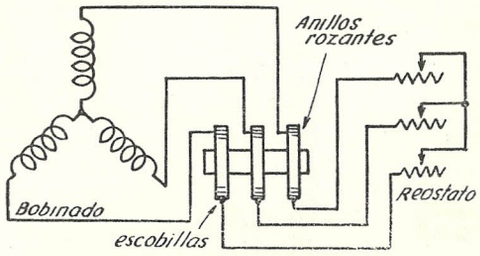

Fig. 133. — Esquema eléctrico de un rotor bobinado.

Este sistema de arranque no implica la supresión de los dispositivos auxiliares para hacer arrancar al motor, los que son indispensables en todos los motores monofásicos de inducción. La intercalación del reóstato se hace a objeto de limitar la intensidad inicial y de aumentar la cupla de arranque.

Los motores de potencia menor o los que no requieren fuerte par de arranque, se hacen con rotor a "jaula de ardilla" como se ve en la figura 134, la que está formada por una serie de barras conductoras puestas en cortocircuito por dos aros metálicos. Barras y aros pueden ser de cobre, armados por remachado o a rosca, o en los modelos de serie, la jaula se hace con fundición de aluminio, colada a presión en las ranuras del núcleo del rotor, con lo que queda hecha la jaula de una sola pieza, abaratándose

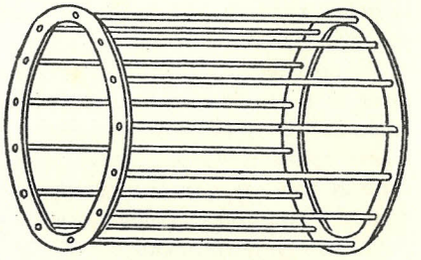

Fig. 134. — Vista de la parte eléctrica de un rotor a jaula.

la mano de obra de fabricación. La misma fundición puede formar también las aletas de ventilación, tomando el conjunto del rotor el aspecto que se ve en la figura 135, muy similar a la 127 pero éste es un motor monofásico mientras que el otro era trifásico. Obsérvese el devanado del estator y la caja de bornes.

ARRANQUE DE LOS MOTORES MONOFÁSICOS

Hemos visto anteriormente que un motor de inducción del tipo monofásico no arranca por sí mismo, sino que debe dársele el envión inicial hasta lograr que se establezca una acción dinámica entre las corrientes del estator y del rotor. En algunos motores se ha dejado este estado de cosas, de modo que para iniciar el movimiento el operador debe tirar de la correa o hacer girar

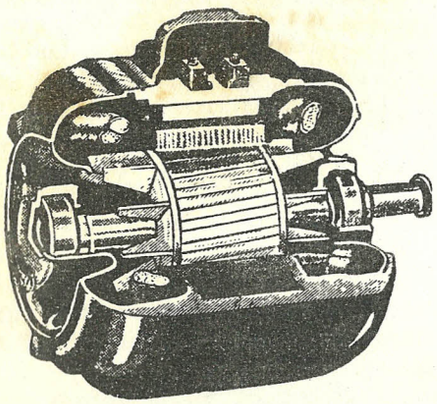

Fig. 135. — En la caja de bornes se ven los dos necesarios para conectar el motor a la red.

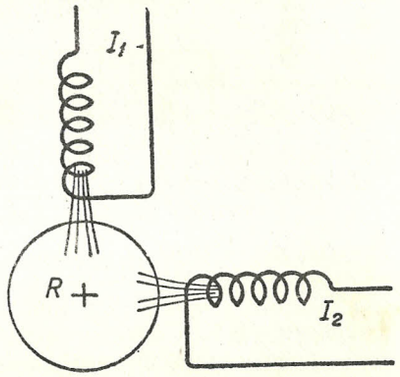

Fig. 136. — Principio de Ferraris.

la polea, pero en casi todos los motores modernos tal acción inicial se provee por sistemas automáticos.

El sistema de arranque debe, pues, suministrar un impulso capaz de hacer girar al rotor durante un corto lapso, pues en seguida comienza a actuar la cupla motora y el funcionamiento se hace normal, siendo innecesario el mecanismo auxiliar. Es por esto que casi siempre el sistema de arranque se desconecta una vez que el motor está en marcha, siendo la desconexión manual o automática, más frecuentemente de este último tipo.

El efecto de movimiento que se emplea se basa en el llamado "principio de Ferraris", que dice que si sobre un sistema capaz de girar al recibir un impulso actúan dos campos magnéticos que guardan posiciones geométricas desplazadas entre sí, a la vez que hay entre ambos flujos un defasamiento angular en el tiempo, se origina una cupla motora que lo pone en movimiento.

Aclaremos lo dicho con la figura 136. El sistema o rotor R está colocado

de modo que es atravesado por los dos flujos magnéticos provenientes de las dos bobinas recorridas por las corrientes I_1 e I_2. Si las dos corrientes no están en fase, cosa que se consigue por diferentes métodos que se verán más adelante, y las bobinas no están sobre un mismo eje, sino que guardan un desplazamiento geométrico como se ve en la figura, sobre el rotor se origina una cupla girante que lo pone en movimiento.

El desplazamiento geométrico óptimo entre las bobinas es de 90°, pero también se obtiene el efecto citado con ángulos menores. Asimismo, el efecto es mayor cuanto mayor sea la diferencia de fase entre las dos corrientes, de modo que será máximo si ésta es de 90°.

Una de las bobinas de la figura 136 está constituída por el bobinado normal del motor, y la otra es la que se denomina "devanado auxiliar", realizado ocupando las ranuras que deja vacías el principal. La variedad de sistemas de arranque radica en la forma como se consigue el defasaje entre las corrientes que recorren ambos bobinados, pues si ambos se conectan a la red, sus corrientes estarían en fase. Se emplean sistemas eléctricos, con resistencias, bobinas o capacitores, y sistemas magnéticos, que describiremos detalladamente, pues forman parte de la máquina misma y son objeto de frecuentes reparaciones por el bobinador electricista.

Sistema magnético de arranque

Llamamos así al método que consiste en modificar la densidad del campo magnético en dos lugares contiguos del estator, con lo que se originan diferencias de flujo en dos puntos que guardan un ángulo geométrico entre sí, dando lugar al efecto Ferraris.

La figura 137 ilustra sobre lo dicho, y en ella puede verse que en una parte del núcleo se ha hecho una hendidura para dejar colocar una espira de cobre de baja resistencia (A), envolviendo a una parte del núcleo.

Como el campo es alternado, se inducirá en dicha espira una corriente del mismo carácter, que tenderá a oponerse a la causa que le da origen y debilitará el campo de la zona 2, que resultará entonces menor que en la zona 1.

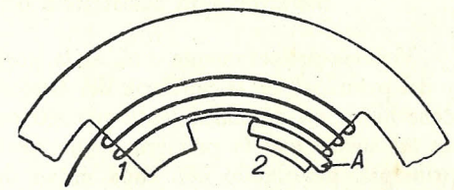

Fig. 137. — Sistema magnético de arranque.

Se tienen dos zonas en la periferia, separadas por un cierto ángulo geométrico, sobre las cuales se presenta diferente densidad magnética, por lo que se origina la cupla por efecto Ferraris, ya descripta, y el rotor se pondrá en movimiento.

Este principio es conocido, pues se aplica en los medidores eléctricos de corriente alternada para provocar el movimiento del disco integrador, y por su sencillez misma no insistiremos en él, para pasar a otros métodos algo más complejos.

El sistema de arranque que hemos denominado "magnético", provee un par de arranque muy bajo, por lo que no es apto para vencer una resistencia inicial elevada. Se utiliza en ventiladores, donde la resistencia opuesta al movimiento es casi nula al principio, cuando el motor no tiene gran velocidad; a medida que se va acelerando, el efecto de rotación es obtenido por la acción entre las corrientes el estator y del rotor y deja de tener influencia el momento de giro ocasionado por las masas polares disimétricas.

Estos tipos de motores suelen tener las masas polares salientes como las máquinas de corriente continua, por lo que se les conoce de inmediato por simple observación. La espira de cobre es frecuentemente una chapa estampada, colocada en el trozo de masa polar que se ha estrangulado a tal fin.

Sistemas eléctricos de arranque

Son muy variados, según la forma de obtener el defasaje entre las corrientes del devanado principal y el auxiliar. En efecto, un defasaje entre dos bobinas se puede conseguir mediante conexión a una de ellas de una resistencia, una bobina o un capacitor, y aun se puede diferenciar según la conexión sea hecha en serie o en paralelo. Como se emplean casi todos los métodos que se entrevén en la frase anterior, pasaremos revista a cada uno de ellos.

También difieren los sistemas de arranque según el dispositivo auxiliar permanezca o no conectado una vez que el motor adquiere el funcionamiento normal, pues algunos lo desconectan automáticamente mediante un dispositivo centrífugo y otros lo dejan conectado, especialmente en el caso de los capacitores, pues no perjudica la marcha ni el rendimiento, prestando en cambio un servicio auxiliar durante el funcionamiento.

Aparte de estos sistemas, hay motores que arrancan como "tipo repulsión" y siguen funcionando como asincrónicos, pero éstos serán tratados aparte.

Sistemas con resistencia óhmica en la fase auxiliar

Veamos primeramente cuál es la posición recíproca del devanado auxiliar y del principal, en la periferia del estator. Según se desprende de lo antedicho debe haber un desplazamiento geométrico entre la fase auxiliar y la principal, de tal suerte que la primera ocupa un eje central con respecto al devanado principal, guardando con cada mitad de este último un ángulo de 120°, y según se ve en la figura 138, esto equivale a la posición recíproca de la figura 139, es decir, que la fase auxiliar se puede considerar en posición perpendicular a la principal, esto es formando con ella un ángulo de 90°

Esto no quiere decir que en la periferia del estator se encuentren las bobinas como se ven en la figura 138, sino que los ejes de las dos secciones del bobinado principal están desplazados de ⅔ de la circunferencia completa y la fase auxiliar ocupa la posición central, simétrica respecto de esas dos secciones, de modo que puede suponerse al bobinado como trifásico, una de cuyas fases

sólo trabaja durante el arranque. Esto lo veremos en detalle al ocuparnos de los bobinados de estos motores.

Si se conectan los bornes superiores de la figura 138 a la red, el bobinado estará recorrido por una corriente, y si se conectan también los inferiores a la misma red, la corriente en el devanado auxiliar estará en fase con la del principal. Para evitar esto se inserta en serie con el bobinado auxiliar una resistencia no inductiva, con lo que la corriente atrasará menos con respecto a la tensión en los bornes que en el bobinado principal, consiguiéndose la diferencia de fase buscada.

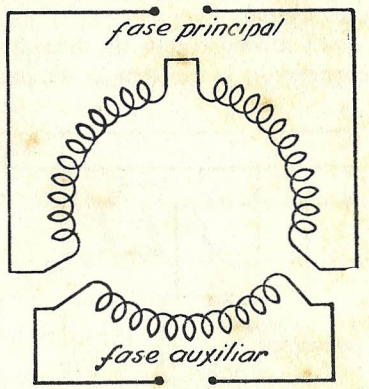

FIG. 138. — Esquema eléctrico del bobinado principal y auxiliar.

En efecto, cuanto mayor resistencia óhmica tenga una bobina, más en fase estará la corriente que la recorre con respecto a la tensión aplicada entre sus bornes, y como la fase auxiliar está hecha con un bobinado similar al que tiene la principal, al colocarle una resistencia en serie, como se ve en la figura 140, esta rama tendrá proporcionalmente mayor resistencia óhmica que la del bobinado principal, y el defasaje entre la tensión de la red y la corriente en el bobinado auxiliar será distinto que en el principal. Como además hay un apartamiento geométrico entre ambos bobinados, se producirá el efecto Ferraris y el rotor se pondrá en marcha, consiguiéndose el arranque del motor, que desde aquí comienza a funcionar como asincrónico normal.

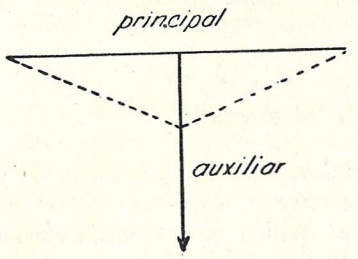

FIG. 139. — Diagrama vectorial de los bobinados del estator.

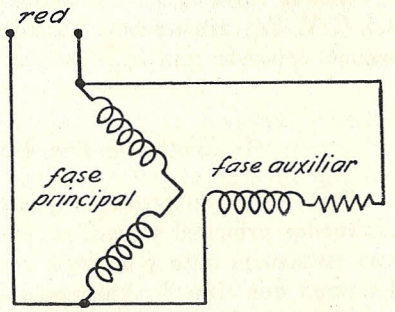

FIG. 140. — Arranque con resistencia en la fase auxiliar.

Un interruptor insertado en serie con el circuito de arranque, permite eliminar éste cuando el motor está en marcha. En lugar de interruptor principal del motor e interruptor auxiliar para arranque, se suele utilizar un conmutador de dos posiciones, una para el arranque y otra para el funcionamiento, que realiza el mismo trabajo que los dos interruptores anteriores. La figura 141

muestra tal tipo de conmutador, que se emplea también para otros circuitos de motores monofásicos que veremos en seguida.

El devanado auxiliar es preferiblemente de alta resistencia con respecto al principal, pues no precisa ejecutarse con el mismo tipo de conductor que este último.

El mismo efecto de defasaje de corriente en la fase auxiliar se consigue conectando la resistencia en paralelo con ella, como se ve en la figura 142,

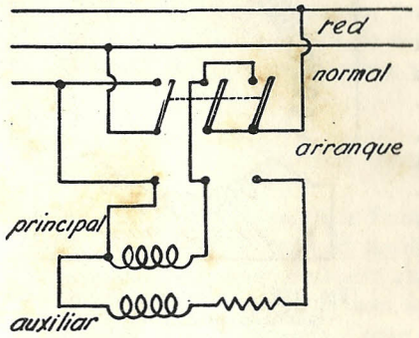

FIG. 141. — Arranque con resistencia en serie con la fase auxiliar.

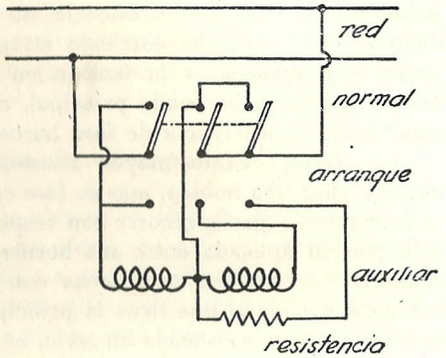

FIG. 142. — Arranque con resistencia en paralelo con la fase auxiliar.

pero hay que preverlo en el diseño para que no tome corriente en exceso, porque al conectarla en derivación disminuye la impedancia combinada y aumenta el pasaje de corriente.

Ambos tipos se los encuentra para potencias comprendidos entre $^1/_{12}$ y 1,5 C.V. Se caracterizan, resumiendo lo dicho, porque la fase auxiliar está menos defasada que la principal.

Sistemas con bobina en la fase auxiliar

Otra forma de provocar diferencias de defasaje en las corrientes de los devanados principal y auxiliar, consiste en conectar en serie con uno de ellos una resistencia pura y en serie con el otro una bobina de reactancia elevada. La rama que tiene la resistencia alcanzará un cierto defasaje respecto de la tensión en los bornes, que será siempre menor que el que tendrá la rama con la bobina en serie.

Como en el caso tratado más arriba, habrá formas variadas de realizar las conexiones, según se disponga en serie o en paralelo los elementos de cada rama, pero la más común es la mostrada en la figura 143, que tiene la resistencia en serie con la fase principal y la bobina insertada en el circuito de arranque. Esto es debido a que la reactancia provoca una caída de tensión muy fuerte, que limitaría en grado sumo la tensión disponible para la fase principal, por lo que se la conecta en serie con la fase auxiliar, que puede

ser hecha previendo esa contingencia; la fase principal, en cambio, debe ser bobinada atendiendo a las características del motor y no a su forma de arrancar. La resistencia a conectar en serie es de valor lo suficientemente bajo como para que no se comprometa la acción inicial, puesto que en funcionamiento normal se desconecta, lo mismo que la bobina y el devanado auxiliar de arranque.

Se obtiene en esta forma que la corriente en el devanado de arranque esté más atrasada que la del principal, o sea el efecto es contrario al sistema con resistencia en la fase auxiliar. Nótese que si bien se habla en el título de "bobina", se utiliza también una resistencia, lo que dice que este sistema se empleará cuando el otro no dé resultado, puesto que es más costoso. En efecto, la cupla de arranque obtenida con una resistencia única en serie con el devanado de arranque no es muy grande, pues se dijo anteriormente que el momento disponible (cupla de giro) era proporcional al defasaje entre las dos corrientes. Con el sistema que estamos describiendo se consigue un apartamiento de fase mayor que en el anterior entre las dos corrientes citadas, por lo que será apropiado para los casos en que se requiera vencer un fuerte momento inicial. Conviene aclarar que la cupla mencionada no es muy grande con respecto a la normal del motor, pues los motores monofásicos se caracterizan por su reducido momento de arranque. Veremos oportunamente cómo se consiguen motores que no adolecen de este defecto, pero que son de construcción más costosa.

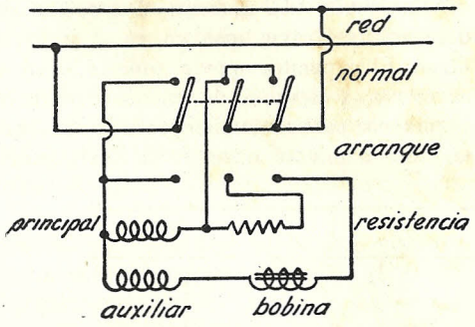

FIG. 143. — Arranque con reactancia en la fase auxiliar.

Tal como se ve en la figura 143, el conmutador en la posición inferior conecta todo el sistema en la forma que se ha descripto, pero al pasar a la posición superior queda únicamente conectada a la red la fase principal. Ambas posiciones se designan: *arranque* y *normal*, respectivamente.

Sistemas que emplean capacitor

Hasta aquí se han explicado métodos de arranque que trataban de atrasar un poco una de las dos corrientes en los dos bobinados del motor, con respecto a la otra. Indudablemente que si se trata de provocar un adelanto en una de esas corrientes se conseguirán defasajes aun mayores, con lo que se tendrá un par de arranque más fuerte, llegándose a obtener 2 veces el par normal.

Esto se consigue conectando un capacitor de fuerte capacidad en la fase auxiliar, el que se desconecta junto con ella una vez alcanzado el funcionamiento normal. Veremos que algunos motores dejan conectado el capacitor

durante la marcha, aun después de obtenido el arranque. Estos motores se denominan comercialmente: "motores capacitor".

El funcionamiento es sumamente sencillo. Es sabido que la corriente a través de un capacitor (si es que se puede llamar corriente al transporte de cargas que se opera en el dieléctrico) adelanta cerca de 90° con respecto a la tensión en los bornes, no llegando exactamente al ángulo teórico debido a la resistencia de pérdidas del capacitor. Si se conecta un capacitor en serie con una bobina, como la corriente en esta última atrasaría cerca de 90° respecto a la tensión, se obtiene un sistema de compensación de fase en el que, según los valores de la inductancia de la bobina y la capacidad del capacitor, se pueden obtener defasajes muy variados en adelanto y en atraso, según cual de los dos elementos predomine.

La figura 144 muestra el esquema de conexiones a seguir en este caso, debiendo aclararse que no es el único empleado pues veremos en seguida otros. El capacitor queda conectado en serie con la fase auxiliar durante el arranque, y después de éste se desconecta junto con ella. La fase principal permanece conectada siempre a la red, tanto durante el arranque como durante el funcionamiento normal. El interruptor simple sirve para anular el circuito

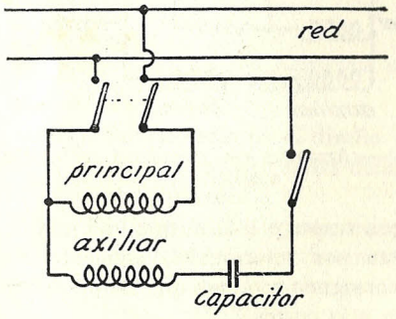

FIG. 144. — Arranque con capacitor en la fase auxiliar.

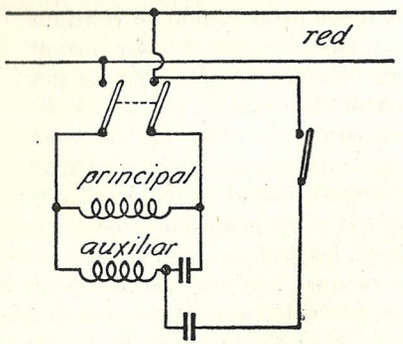

FIG. 145. — Arranque con doble capacitor.

de arranque después que el motor alcanza cierta velocidad. Veremos que casi siempre se emplea un interruptor automático centrífugo en lugar del manual.

Con los motores de capacitor desconectable se consiguen cuplas de arranque de valores 2 a 2,5 veces la cupla normal y trabajan con un factor de potencia de 0,6 a 0,8.

Para mejorar el factor de potencia de servicio se construyen los motores con dos capacitores, uno de los cuales se desconecta después que se ha iniciado la marcha y el otro permanece conectado para mejorar el citado factor de potencia. El par de arranque es en ellos algo menor que los anteriores (1,5 veces el normal), pero se mejoran las características de funcionamiento.

La figura 145 muestra el esquema de conexiones a seguirse en este caso, haciendo notar que el interruptor destinado a sacar de circuito uno de los

capacitores puede ser del tipo centrífugo automático. Como se ve, durante el funcionamiento normal, después que se ha abierto el interruptor simple de la derecha, uno de los capacitores y el devanado auxiliar permanecen en circuito.

Un tipo de motores que se basa en este principio y que lleva al máximo la simplificación de conexiones y operaciones de puesta en marcha y funcionamiento, es el que utiliza capacitor en serie con la fase auxiliar, pero en el que ambos elementos quedan conectados permanentemente durante el arranque y el funcionamiento normal. El par de arranque no es tan elevado como en los los dos tipos anteriores, porque el capacitor debe ser diseñado atendiendo a las necesidades del motor en marcha y no al circuito de arranque, pero tanto en este modelo como en el de doble capacitor, el factor de potencia llega a valores de 0,9 a 0,95, que como se puede apreciar son óptimos.

Se construye para potencias comprendidas entre ¼ y 2 C.V. y para velocidades correspondientes a las sincrónicas de 1500 y 3000 r.p.m., es decir con bobinados de 2 y 4 polos.

En todos los motores con capacitor de arranque o doble capacitor, la corriente inicial que absorben de la red es considerablemente mayor que la normal de plena carga, alrededor de 3,5 hasta 5 veces esta última, por lo que se debe prever este detalle en los sistemas de protección térmica o magnética de líneas.

Tenemos todavía otro tipo de motores con capacitor en la fase auxiliar que emplean un autotransformador y un solo capacitor y que se ve en la figura 146. Durante el arranque, el autotransformador aplica una tensión elevada (500 a 600 Volt) al capacitor para obtener la fuerte corriente nece-

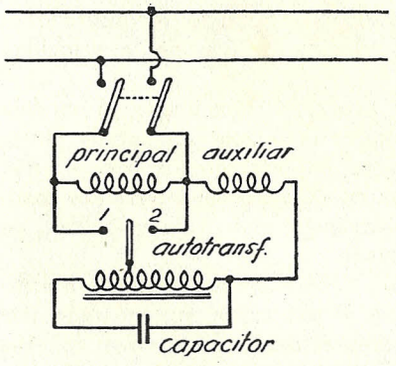

FIG. 146. — Arranque con autotransformador y capacitor.

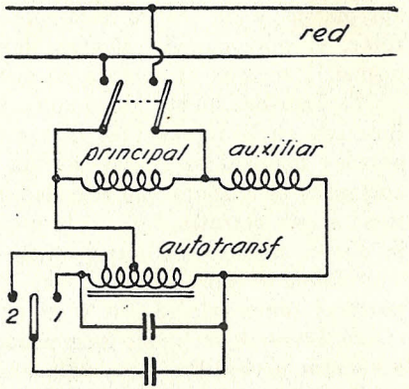

FIG. 147. — Arranque con autotransformador y doble capacitor.

saria durante esta parte del proceso, y después un dispositivo automático cambia las conexiones de modo que se reduce la tensión aplicada al capacitor a valores iguales o próximos a los de la red. Veamos cómo trabaja el dispositivo.

Durante el arranque, el conmutador manual o automático está en la posición 1, con lo que queda conectado a la red el bobinado auxiliar, en serie con

el autotransformador y todo el conjunto en paralelo con el bobinado principal. Al capacitor se le aplica la tensión de la sección secundaria del autotransformador y el conjunto funciona como cualquiera de los tipos anteriores, suministrando una fuerte cupla de arranque. En marcha, el conmutador pasa a la posición 2 y el capacitor queda cerrado sobre una parte del autotransformador para su descarga silenciosa.

Si se desea obtener compensación de fase durante la marcha, se construye el motor con doble capacitor, y se coloca también el autotransformador en la forma que se ve en la figura 147. Aquí el conmutador cambia las conexiones de modo que durante el arranque la tensión aplicada a uno de los capacitores es distinta que la que le toca durante el funcionamiento normal. La posición 1 es la de arranque y la 2 es la de marcha. Se consigue así que el efecto del capacitor sea apropiado para las dos clases de trabajo que realiza, es decir, para suministrar la cupla de arranque y para compensar el defasaje del motor.

Dispositivo interruptor centrífugo

En casi todos los motores monofásicos de inducción descriptos hasta aquí, se ha hablado de un interruptor que desconectaba la fase auxiliar de arranque con el elemento conectado en serie o en paralelo con ella. En los esquemas de conexiones figuraba un conmutador de dos posiciones y tres cuchillas, para poder hacer las dos series de conexiones correspondientes al arranque y a la marcha normal.

En algunos modelos de motores el paso de una a otra forma de marcha es automático y se realiza mediante un dispositivo centrífugo incorporado al rotor, el que, cuando alcanza una cierta velocidad (75% de la velocidad normal), acciona al aparato en cuestión.

El funcionamiento es simple, y puede explicarse atendiendo al modelo ilustrado en la figura 148. El centrífugo está formado por un par de piezas pesadas mantenidas juntas por un resorte; en tal posición los brazos están colocados de manera que el collar que apoya en el brazo del interruptor mantiene a éste cerrado. Esta es la posición de arranque y de baja velocidad, en la que el circuito auxiliar permanece conectado.

Cuando el rotor adquiere mayor velocidad, debe comenzar el motor a comportarse como asincrónico y no es necesario el par motor suministrado por efecto Ferraris, de modo que puede eliminarse el devanado auxiliar con sus elementos accesorios. Esto vale hasta cierto punto, pues se vió que algunos motores dejan conectado durante el funcionamiento normal el capacitor para mejorar el defasaje entre la corriente y la tensión de línea. Suponiendo que se trate de un motor construído para eliminar el circuito de arranque durante la marcha, puesto que los otros no tienen centrífugo, o lo usan para desconectar uno de los dos capacitores o para cambiar las conexiones del autotransformador, según se vió más arriba, el aparato actúa en la siguiente forma:

Al aumentar la velocidad las dos piezas del centrífugo se separan, venciendo la tensión del resorte, y el collar se corre moviéndose entonces la

palanca o brazo del interruptor, que abre el circuito desconectando los elementos que deben dejar de trabajar.

En la figura 148, el motor es del tipo de capacitor en la fase auxiliar, que como se ve, se ha colocado en la parte superior. Obsérvese además, el corte del inductor, en el que se ve el bobinado, y el rotor, del tipo en cortocircuito con ranuras oblicuas.

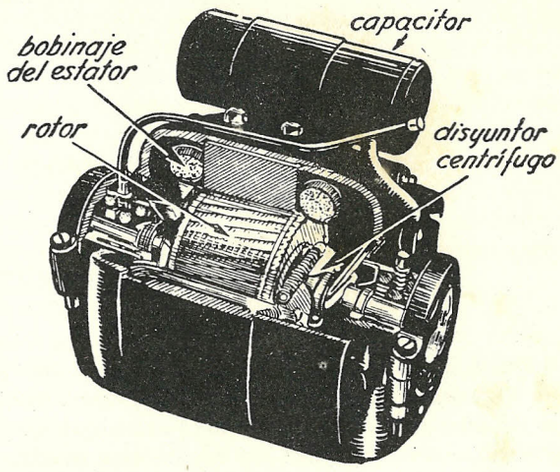

Fig. 148. — Corte de un motor "Capacitor".

Otros dispositivos

No es la descripta la única forma constructiva utilizada para el interruptor automático del circuito de arranque, pues un simple interruptor puede ser accionado en varias formas.

Basándose en que la corriente absorbida por el motor se reduce al alcanzar el rotor cierta velocidad, se utilizan a veces relevadores que mantienen cerrado el interruptor mientras la corriente no baja de cierto valor. Una vez que aquella se reduce lo suficiente, cae la armadura del relevador y se abre el circuito auxiliar.

Cabe mencionar además, los motores que durante el arranque se comportan como los del tipo a repulsión, y cuando han alcanzado cierta velocidad, un dispositivo centrífugo distinto del anterior, pues debe cortocircuitar todo el colector, se encarga de pasar al funcionamiento como motor asincrónico normal. La ventaja de tales motores, como se verá más adelante, estriba en el fuerte par de arranque de los de repulsión, que se aprovecha durante el momento en que se necesita, esto es, en el arranque mismo.

CAPITULO IX

MOTORES UNIVERSALES Y DE REPULSIÓN

Los motores eléctricos de cierta potencia, en los que se busca el máximo de rendimiento y las óptimas condiciones de funcionamiento, se construyen de acuerdo con la clase de corriente disponible para alimentarlos. Así, para redes de corriente continua se encuentran motores de esa clase, con excitación en derivación, en serie o compound, según la aplicación a que está destinado. Para corriente alternada tenemos los motores sincrónicos y asincrónicos y dentro de estos últimos, los tipos monofásicos y trifásicos.

Hay una serie de pequeños aparatos eléctricos que son accionados por motorcitos, en los cuales el rendimiento es cosa secundaria, contemplándose en cambio el tamaño, peso, flexibilidad y otros factores que inciden sobre la comodidad que proporciona el uso. Por esto, se construyen motores que puedan servir tanto para redes de corriente continua como de alternada, entendiendo que de estas últimas sólo consideramos las monofásicas.

Tales motores se denominan *universales* y se comportan correctamente en una de las dos clases de corriente y deficientemente en la otra, pero permiten la venta de artefactos que sirvan para ambas corrientes, es decir que el usuario no encontrará inconvenientes si se le presenta la oportunidad de utilizarlo en cualquiera de ellas o en ambas.

Principio de funcionamiento

Recordemos algunas características de los motores de corriente continua con excitación en serie, que pueden leerse en el capítulo IV. La figura 149 muestra el esquema de conexiones de este tipo de motores, en los que el inducido está en serie con el devanado de los campos inductores.

Si se invierte el sentido de corriente en el campo y no en el inducido o viceversa, se obtendrá una inversión del sentido de giro del rotor, lo mismo que en los demás motores de corriente continua. Pero si se invierte la pola-

ridad de la red, se producirá un cambio simultáneo de la circulación de corriente en los dos devanados, inducido e inductor, y el motor mantendrá el movimiento de rotación original.

Supongamos que cambiamos la polaridad de la red rápidamente, muchas veces por segundo, y las cosas pasarán como recién se explicó, salvo que aumentará el chisporroteo en las escobillas. Si el motor se conecta a una red de corriente alterna, en la que la polaridad cambia muchas veces por segundo, en cantidad correspondiente con la frecuencia, el motor debe mantener el sentido de giro y funcionar. Pero hay que hacer algunas observaciones, pues ese funcionamiento no será normal.

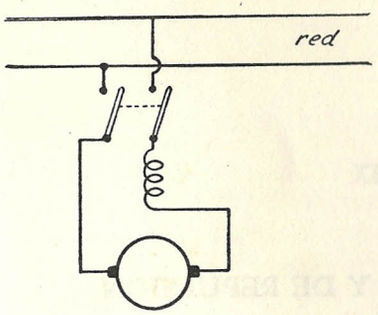

FIG. 149. — Esquema de conexiones de un motor con excitación en serie.

El devanado del inductor, sea de dos o más polos, está formado por un núcleo de hierro alrededor del cual se arrollan una gran cantidad de espiras. Los distintos núcleos polares llevan sus bobinados casi siempre conectados en serie y el conjunto, a su vez, se conecta en serie con el inducido. Éste está también compuesto por una cantidad de bobinas, cada una con varias espiras y teniendo núcleo de hierro.

Es lógico pensar que todo el conjunto presentará a la corriente continua una resistencia que será mucho menor que la impedancia que le ofrece a la corriente alternada, pues los electroimanes inductores por ejemplo, tienen muy baja resistencia óhmica pero alta reactancia, por lo que la intensidad de corriente, si se lo conecta a la red de continua, será la prevista, pero en alternada será mucho menor y no se obtendrá un funcionamiento regular.

El problema se puede solucionar más o menos eficientemente en el inductor, en la forma como veremos en seguida, pero no tan fácil en el rotor, por lo que se opta por diseñar al inducido de manera que se comporte más o menos bien en las dos corrientes, sacrificando un bobinado ideal para corriente continua en aras de obtener otro que sirva para las dos clases de corriente.

El inductor puede ser hecho de dos maneras distintas, bien con un solo devanado con derivaciones o sino con dos devanados distintos. La primera solución es más económica, y se emplea en los motores más pequeños, y la segunda es más racional, pero aumenta el tamaño de los campos y con ello, el del motor.

La figura 150 muestra el esquema de conexiones empleado en el primer sistema, es decir, haciendo los campos inductores con derivaciones. En corriente continua trabaja toda la bobina de campo, y cuando se desea conectar el motor a una red de corriente alterna se corre la palanca de un conmutador a la posición (c. a.) y sólo queda insertado en el circuito una parte del bobinado. Es común que esta parte de la bobina esté hecha con alambre

más grueso que la otra sección, para reducir aun más la impedancia sin disminuir el número de Amper-vueltas, que ya resulta menor por tomar sólo una fracción del arrollamiento.

El núcleo del inductor debe ser hecho con chapas y no macizo porque sino en la conexión para corriente alterna se inducirían en la masa de hierro corrientes parásitas de valor elevado, que aumentarían desmesuradamente las pérdidas y el calentamiento del motor. El rotor también se hace con palastro, pero en los motores de corriente continua lo mismo debe hacerse así porque como se mueve dentro de un campo magnético, se inducen en su masa corrientes parásitas aunque no se conecte el motor a una fuente de corriente alternada. De modo que la diferencia está en el inductor, que en los motores de continua puede ser macizo mientras que en los universales es laminado.

Generalmente se construyen las chapas para el rotor y para el estator de una sola placa circular, obteniéndose las dos piezas por estampado, en el que quedan separadas ambas partes. Se une luego un paquete de chapas para

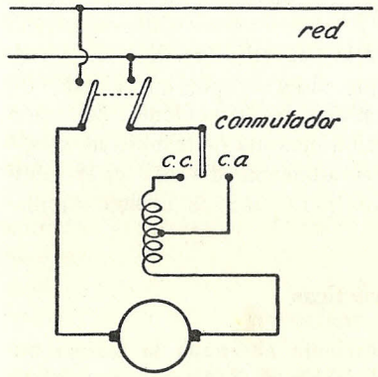

FIG. 150. — Esquema de conexiones de un motor universal con derivación en el campo único.

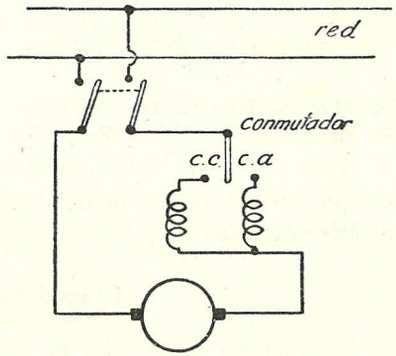

FIG. 151. — Esquema de conexiones de un motor universal con doble campo inductor.

cada núcleo, dando el entrehierro conveniente por torneado. Generalmente el número de ranuras del estator de estos motores es reducido, y el número de delgas es doble del anterior, como se verá más adelante. También casi siempre son bipolares, salvo algunos casos de motores tetrapolares.

Dijimos que otra manera de obtener el funcionamiento del inductor en las dos clases de corriente era dotarlo de dos bobinados distintos, solución que puede verse en la figura 151. Un conmutador se encarga de pasar de una bobina de campo a la otra. La que corresponde a corriente alternada tiene menor cantidad de espiras y está devanada con alambre de mayor diámetro que la de continua, para presentar menor impedancia.

Esta solución no es la más generalizada, porque se consiguen los mismos resultados si se aprovecha el bobinado de alternada y se agregan las espiras necesarias en serie para trabajar en corriente continua, como se ve en la figura 150.

Funcionamiento con distintas tensiones

Hay todavía tipos de motores universales que son aun más flexibles que los anteriores. Se trata de los que, además de funcionar en ambas corrientes pueden trabajar con distintas tensiones de la red. Para ello se sacan varias derivaciones en el devanado o sección del devanado inductor que corresponde a cada una de las dos clases de corriente y se llevan a un selector, como se ve en la figura 152.

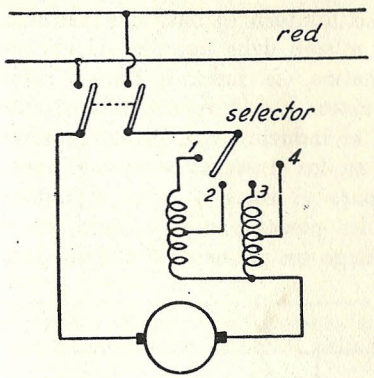

FIG. 152. — Esquema de conexiones de un motor universal para varias tensiones.

Por un extremo el bobinado de campo queda conectado al inducido mediante una escobilla, y por el otro queda unido a un borne de la red a través del selector, de manera que se intercala en serie con el rotor una bobina de campo de resistencia ajustable a la tensión disponible en la red.

Hay que observar que en el inducido no se cambian las conexiones de modo que la tensión máxima de trabajo no puede ser desmesuradamente distinta de la mínima, porque habría que anular todo el inductor para tener la misma circulación de corriente.

Consideraciones prácticas

Los motores universales no rinden en corriente alternada la misma potencia que en corriente continua, pues en el mejor de los casos se obtiene un 70 a 75 % de esta última. Además, en corriente alternada tienen peor conmutación, es decir, mayor chisporroteo en las escobillas.

Si se desea obtener regulación de la velocidad de giro, se pueden derivar resistencias en el circuito inductor, pues debilitando el campo magnético se aumenta la velocidad y reduciendo la tensión aplicada al motor disminuye el número de giros por minuto. El procedimiento es en todo similar al que se aplica a los motores de corriente continua.

Para potencias grandes no se construyen motores universales, salvo para redes de baja frecuencia (hasta 25 ciclos por segundo) para que la conmutación no sea demasiado mala. Al reducir la frecuencia mejora la conmutación, por reducirse los fenómenos de autoinducción en las bobinas del inducido, y se puede tolerar el funcionamiento.

Es raro que los motores universales tengan portaescobillas ajustables, de modo que la posición de las escobillas viene ajustada de fábrica y no se podrá desplazarlas para disminuir el chisporroteo bajo las mismas. Por esto conviene que trabajen siempre con la misma carga para la cual han sido diseñados.

MOTORES MONOFASICOS DE REPULSION

El motor a repulsión es, en esencia, un motor formado por un rotor bobinado como los de corriente continua, pero con las dos escobillas puestas en cortocircuito por un puente conductor, y un estator bobinado como en los motores de corriente alternada, concentrado o distribuído, según la potencia e importancia.

Tiene la valiosa propiedad de poseer una elevada cupla de arranque, que lo hace apto para arrancar con carga, es decir, acoplado directamente al mecanismo que debe accionar, cosa que no se encuentra en muchos tipos de motores monofásicos, como los asincrónicos por ejemplo. En este sentido se puede comparar al motor serie de corriente continua, ideal para ser utilizado en vehículos, grúas, etcétera, por su fuerte momento de arranque, necesario para vencer la inercia de reposo de los mecanismos a accionar. Las características de trabajo de los motores a repulsión son comparables a las de los motores serie, con la diferencia de que el rotor no tiene ninguna conexión con el exterior, pues las escobillas quedan unidas simplemente por un puente conductor.

Tiene además la facilidad de poder regular la velocidad con solo girar el portaescobillas de su posición inicial hasta la final, en total un cuarto de vuelta completa, dando velocidades muy distintas, pero afectando también a la cupla girante, que es máxima para una posición determinada de las escobillas denominada "normal" y para la que el rotor gira con la velocidad normal.

Principio de funcionamiento

Supongamos tener un rotor bobinado como el de un motor de corriente continua, pero con las escobillas unidas en cortocircuito, colocado dentro de un estator con dos bobinados apartados de 90° entre sí, como se ve en la figura 153. Uno de los bobinados se llama de "excitación" y el otro de "compensación".

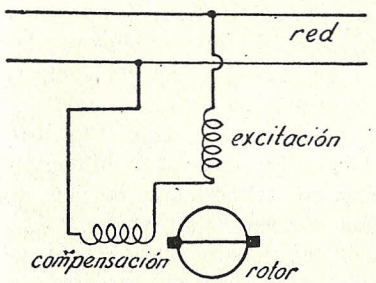

FIG. 153. — Principio del motor a repulsión.

El bobinado de excitación está encargado de producir un campo magnético que atraviese al rotor, de modo que en realidad tendremos dos partes del mismo colocadas la mitad arriba y la mitad debajo, como en los motores bipolares de corriente continua.

El bobinado del rotor que abarca este campo magnético está colocado en posición horizontal, pero a circuito abierto, pues veremos en todos los trazados de bobinados para corriente continua que las escobillas ocupan la posición de los ejes de las bobinas conectadas a las delgas que apoyan en ellas. En una bobina

abierta no puede circular corriente, de modo que si el motor tuviera solamente este devanado no podría funcionar. Puede ser asimilado este caso al de un transformador con el secundario abierto por el que no circula corriente.

El bobinado de compensación está colocado perpendicularmente al de excitación, de modo que el campo magnético producido por él será abarcado por las bobinas verticales del rotor, las que están puestas en cortocircuito por las escobillas; luego se comportarán como un transformador con el secundario en cortocircuito, circulando por ellas una corriente elevada. Si sólo existiera este devanado, entre esa corriente y el campo magnético de él no se ejercería acción dinámica alguna, por estar los lados de bobina fuera del campo y el motor tampoco funcionaría, pese a la fuerte corriente que recorre el rotor.

Como tenemos dos bobinados, entre el campo magnético del de excitación y la corriente inducida en el rotor por el de compensación, se origina una fuerza de repulsión que tiende a hacer girar al rotor, comenzando a funcionar.

Al girar el rotor, se van cambiando las bobinas de él que están en posición horizontal y vertical, pero como ni los devanados del estator ni las escobillas con su puente de cortocircuito cambian de posición, la marcha continúa por el mismo efecto descripto.

En la práctica los motores a repulsión no se construyen en la forma señalada, sino que se les coloca un solo devanado en el estator, como se muestra en la figura 154, pero las escobillas no están en la posición de la figura anterior, sino que guardan con ella cierto ángulo (a), referido al eje horizontal (las posiciones horizontal y vertical mencionadas corresponden al dibujo y no al motor mismo).

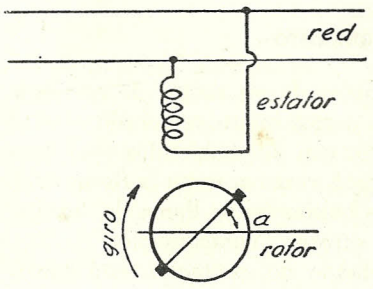

Fig. 154. — Esquema del motor a repulsión.

El único devanado del estator tiene dos efectos distintos: produce un campo magnético que es abarcado por las espiras abiertas, es decir, por las bobinas que están unidas a delgas no cortocircuitadas por las escobillas, y en esto se comporta como el bobinado de excitación explicado anteriormente. Por otra parte, su campo magnético es abarcado también por las bobinas que están puestas en cortocircuito por las escobillas, de modo que se inducirá en ellas una corriente que las recorrerá, y entre cuya corriente y el campo magnético se ejercerá una acción de repulsión que hará girar al rotor, en la forma ya explicada anteriormente. El sentido de giro está indicado en la figura.

Supongamos que el portaescobillas puede ser girado desde la posición horizontal hasta la vertical. En la posición horizontal, en la que el ángulo (a) vale cero, el motor se comporta como el de la figura 153, si sólo tuviera el bobinado de excitación; en el rotor no se induce corriente alguna y no funciona, pues no tiene cupla de giro. Esta posición de las escobillas es la de arranque en los motores dotados de regulación.

Si las escobillas están en posición vertical, es decir, la que corresponde a un valor 90° para el ángulo (a), se trata del motor de la figura 153 con bobinado de compensación solamente, y vimos que se inducía en las bobinas del rotor una fuerte corriente, pero que no había tampoco cupla de giro, por lo que el motor no arranca. Esta posición se denomina: "de cortocircuito", y la corriente que toma de la red es muy grande, porque la corriente que recorre el rotor debe ser transferida a él por el estator como si se tratara de un transformador en cortocircuito.

La posición de las escobillas que produce el máximo momento de giro es para un ángulo (a) de 75 a 80° desde la posición inicial. A distintas posiciones de las escobillas corresponden distintas cuplas de giro y velocidades de rotación, de modo que el procedimiento de regulación es muy cómodo. Los motores de cierta potencia están construídos con portaescobillas girable, para obtener arranque suave y funcionamiento regulable.

Los motores de repulsión de potencia reducida se hacen con escobillas fijas, en la posición que produce el máximo momento de giro, y en ellos no es necesaria regulación alguna, salvo que se le intercalen en serie resistencias, con lo que se varía la velocidad hasta un 35 % del valor nominal.

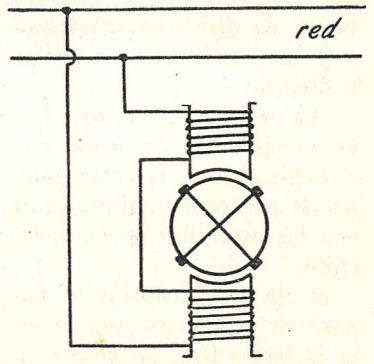

Fig. 155. — Motor a repulsión con doble serie de escobillas.

Un inconveniente de estos motores es que su velocidad es muy variable al modificarse la carga, por lo que se suele remediar ello colocando doble juego de escobillas, como se ve en la figura 155. En estas condiciones se amortigua la variación y se obtiene mayor constancia del número de revoluciones por minuto.

La elevada cupla de arranque de los motores de repulsión, que llega hasta 4 a 4 1/2 veces la cupla normal de marcha, los hace especialmente aptos para todos los casos en que deban vencer una fuerte inercia inicial, como en compresores, bombas, etcétera.

Bobinados de los motores a repulsión

El devanado del estator de estos motores es exactamente igual a cualquiera de los motores asincrónicos monofásicos que se describen en los capítulos XXI y XXII. Tendrá pues, un estator con una serie de ranuras en las que se alojarán los conductores formando bobinas, según se vió. También pueden tener devanados concentrados con masas polares salientes o no, como los motores de corriente continua, siendo casi siempre de dos polos.

En todos los casos, el bobinado del estator se conecta directamente a la red, según el esquema de la figura 154 ó 155, mediante un interruptor bipolar.

Como no lleva fase auxiliar de arranque, si se trata de un bobinado distribuído, se hará a ocupación parcial de ranuras, dejando más o menos 1/3 vacías, por las razones que se verán en su oportunidad para los motores asincrónicos monofásicos. En realidad, se hacen con devanado distribuído los motores a repulsión-inducción, de los que nos ocuparemos más adelante.

El rotor tiene un bobinado común de corriente continua, como los motores universales, frecuentemente igual al de éstos.

MOTORES A REPULSIÓN - INDUCCIÓN

Uno de los inconvenientes de los motores a repulsión es el excesivo chisporroteo en las escobillas, que deteriora las delgas del colector y obliga a frecuentes reparaciones. Tiene en su favor la valiosa propiedad de suministrar una fuerte cupla de arranque que se presta a utilizarlo en compresores por ejemplo, por lo que los fabricantes de estos adminículos utilizan un motor de diseño especial que arranca como motor de repulsión y al llegar a la marcha normal se comporta como un motor de inducción o asincronico ordinario.

El motor está construído como uno de repulsión común, pero el estator es siempre con devanado correspondiente a un motor asincrónico. El rotor es bobinado, con colector como los de corriente continua, pero con las escobillas en cortocircuito.

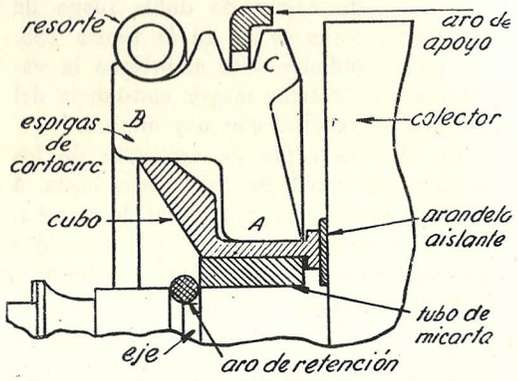

FIG. 156. — Dispositivo centrífugo de los motores a repulsión-inducción.

El eje tiene acoplado el dispositivo centrífugo que se ve en la figura 156, que consta de las espigas B que están soportadas por resortes, manteniéndolas alejadas del frente del colector y apoyadas en el aro de soporte. El conjunto está aislado del eje con una arandela de micarta y un tubo del mismo material. Cuando el rotor se ha puesto en marcha, funcionando como motor a repulsión, el resorte empieza a ser vencido por la fuerza centrífuga que obra sobre las espigas en su parte B, con lo que las partes C se apoyarán en el frente del colector cortocircuitando las delgas y poniendo así a todo el devanado del rotor en cortocircuito. El motor comienza a funcionar como asincrónico, con rotor devanado en cortocircuito.

Este motor goza durante el arranque del fuerte momento inicial de giro de los motores a repulsión durante la marcha. Este detalle debe ser tenido del chisporroteo de escobillas, pues si bien las mismas quedan apoyadas en el colector, no ejercen ninguna acción, ya que éste está totalmente cortocircuitado por las espigas. En marcha tiene las propiedades favorables de los motores a inducción, de marcha silenciosa y constancia de velocidad, aun frente a variaciones de la carga.

En cuanto a los devanados, nada hay que agregar a lo dicho referente a otros tipos de motores a repulsión, pues son iguales, teniendo en el estator un bobinado común de motor de alternada y en el rotor un devanado de corriente continua.

Se encuentran estos motores en las heladeras eléctricas con compresor accionado por un motor eléctrico. También se utilizan en otros casos donde se requiera fuerte par de arranque y se quiera evitar los inconvenientes de los motores a repulsión, pero carece durante la marcha del inconveniente muy en cuenta en los casos de colocar el motor en lugares con emanaciones inflamables, donde no se concibe un colector con chispa bajo las escobillas, debiendo recurrirse a los motores asincrónicos, pero como no siempre éstos son aptos para el trabajo a que están destinados, sobre todo los monofásicos por su débil cupla de arranque, se suele emplear motores de repulsión-inducción.

PARTE TERCERA

BOBINADOS DE CORRIENTE CONTINUA

BOBINADOS DEL INDUCTOR – BOBINADOS DEL INDUCIDO – BOBINADO IMBRICADO O PARALELO – BOBINADO ONDULADO O SERIE – BOBINADOS MÚLTIPLES Y SERIE-PARALELO – CONEXIONES EQUIPOTENCIALES – CÁLCULO DE BOBINADOS Y REBOBINAJES.

CAPÍTULO X

BOBINADO DEL INDUCTOR

Ya se vió que la máquina eléctrica se puede dividir en dos partes fundamentales: circuito magnético y circuito eléctrico. Ambas secciones tienen partes metálicas, bornes y devanados. En este capítulo nos dedicaremos al arrollamiento de los inductores, es decir, al diseño de los electroimanes que suministran el campo magnético que necesita la máquina.

De estos bobinados, interesa conocer su número, tamaño, forma, cantidad de espiras, sección del conductor y forma de conectarlos. Cada uno de estos puntos puede determinarse para máquinas nuevas, o para los casos de reparación o reconstrucción, tal vez más frecuentes que los anteriores.

Número de inductores

La cantidad de bobinados de campo coincide con el número de polos del motor o generador, es decir, será de dos para los bipolares, cuatro para los tetrapolares, etcétera. No mencionaremos aquí los polos auxiliares y arrollamientos compensadores, utilizados para mejorar la conmutación y evitar el calaje de escobillas, puesto que ello pertenece al estudio del inducido.

Es fácil pues, en una máquina en reparación que tiene inutilizado un devanado de campo, reproducirlo por comparación con los que han quedado en buen estado, ya sea pesándolo para determinar la cantidad de conductor a emplear, cuya sección se mide con un calibre, o apreciando el número de espiras por otro método.

Cada uno de los inductores se alojan en las masas polares, entre la carcasa y las expansiones polares, colocándolos en una posición tal que el sentido del bobinado y recorrido de la corriente guarde ciertas reglas que trataremos más adelante en la parte correspondiente a esquemas de conexiones. Asimismo, se verá que pueden conectarse todos los inductores en serie, por ejemplo, o en grupos serie-paralelo, o formando otras combinaciones, según

el tipo de máquina. A veces, se pasa de una a otra forma de conexión por tener que utilizar el motor en tensiones distintas, como por ejemplo, pasarlo de redes de 220 Volt a redes de 110 Volt, o de 440 Volt a 220 Volt.

La gran diversidad de casos, hace imposible una referencia completa, de modo que nos limitaremos a los más comunes en la práctica.

Forma y tamaño de los inductores

Cada una de las bobinas a colocar en las masas polares, se devanan sobre carretes de madera que tienen la forma ilustrada en la figura 157, ya sea con movimiento a mano o mecánico.

El alma del carrete tiene la forma y tamaño de la masa polar de la máquina para la que está destinado el campo, es decir, tendrá casi siempre sección rectangular, ligeramente superior a la de la masa polar, para facilitar la colocación.

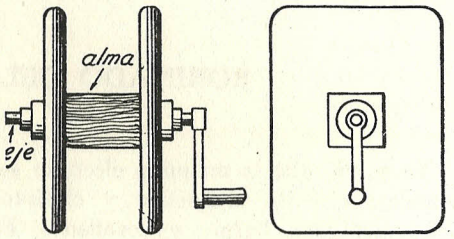

FIG. 157. — Carrete para el bobinado de los campos inductores.

Las tapas del carrete son desarmables a efectos de quitar la bobina una vez terminadas. El eje se fija a los dos cojinetes de la bancada de bobinajes, quedando la manija o la polea de accionamiento afuera de uno de ellos.

Cada carrete sirve solamente para un tipo y tamaño de campo a bobinar, por lo que habrá que disponer de un juego de ellos, si se tiene que construir distintos tipos de inductores. A veces, cuando la sección transversal de la masa polar no difiere, en máquinas de potencias no muy distintas, servirá un carrete para unos cuantos tamaños de campo, teniendo las dos tapas mayor dimensión que la necesaria para los menores tamaños de bobinas, lo que no representa un inconveniente, puesto que no se llenan totalmente de vueltas de conductor los carretes, sino que se da el número necesario, controlado con un contador de espiras o cuenta-revoluciones. El conductor con que se devanan los campos es, generalmente, de cobre esmaltado, para economizar espacio y puesto que la aislación entre capas o espiras contiguas no debe ser muy grande. Terminado el bobinado de campo se lo retira del carrete y se lo envuelve con

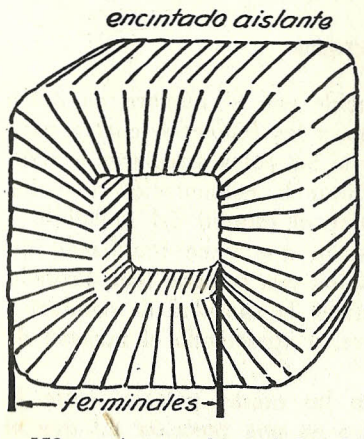

FIG. 158. — Aspecto de un bobinado de campo terminado.

cinta de algodón, que se impregna después con barnices o lacas aislantes.

El aspecto de una bobina de inductor terminada, se puede ver en la figura 158, con la envoltura de cinta colocada. La entrada y salida del devanado se deja con trozos sobrantes, que forman los terminales para conectar la bobina a las otras, o a los bornes correspondientes del motor o generador.

De inmediato veremos cuál debe ser el número de espiras de estas bobinas, y cuál la sección del conductor empleado, con cuyos datos se puede construir cualquier devanado de campo de un generador o motor eléctrico.

NÚMERO DE ESPIRAS DE LOS INDUCTORES

Para la apreciación de la cantidad de vueltas que debe tener cada bobina inductora, distinguiremos dos casos: máquinas existentes y máquinas nuevas. La diferencia con que se encara el diseño en ambas es fundamental, por lo que lo trataremos separadamente.

Máquinas existentes

Suponiendo que en el motor o generador se encuentren disponibles, para analizarlos, uno o más de los bobinados inductores que traía de fábrica, es cuestión de determinar la sección del conductor empleado en la bobina, y el número de espiras.

La sección es de fácil determinación mediante un calibre o palmer, que suministra el diámetro, y con él se identifica inmediatamente el tipo de alambre que tiene el devanado.

Para saber el número de espiras, se puede pesar uno de los bobinados de campo, sin interesar otro detalle, pues se apartará de un rollo del mismo tipo de conductor un peso igual, y se bobinará sobre el carrete correspondiente, hasta que se termine la cantidad separada, con lo que se puede suponer que las cantidades de espiras si no son iguales, no diferirán mucho.

Otro procedimiento, tal vez menos exacto, es calcular la cantidad de espiras que tiene el bobinado de campo mediante el conocimiento de la sección transversal. En efecto, si el diámetro del alambre con aislación incluída se conoce, basta ver cuántas veces cabe una sección cuadrada que tenga por lado el diámetro del alambre, en el corte transversal de un lado de la bobina (se sobreentiende que se medirán los lados de ese corte, exteriormente, sin cortarla).

Así, por ejemplo, si el conductor tiene 0,50 milímetros de diámetro, el cuadrado que ocupará tiene una sección de:

$$0{,}50 \times 0{,}50 = 0{,}25 \text{ milímetros cuadrados}$$

Suponiendo ahora que un lado de la bobina tiene una sección transversal de 25 milímetros por 40 milímetros, el valor de esa sección será:

$$25 \times 40 = 1000 \text{ milímetros cuadrados}$$

La cantidad de conductores que ocupan cada uno 0,25 milímetros cuadrados, que pueden pasar por una sección de 1000 milímetros cuadrados, se obtiene dividiendo 1000 por 0,25, lo que da un resultado de:

4.000 espiras

que serán aproximadamente las que tendrá la bobina. Decimos aproximadamente, porque este cálculo supone que el bobinado se hace tan apretado que entra exactamente la cantidad teórica de espiras; en la práctica, suele entrar de 10 a 20 % menos que las cifras teóricas, para bobinados a máquina y a mano, respectivamente.

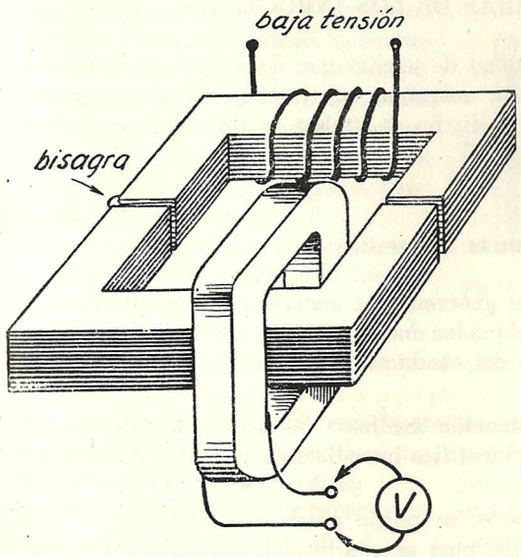

FIG. 159. — Dispositivo empleado para determinar si el número de espiras de un bobinado es igual a otro tomado como modelo.

Una forma de verificar aproximadamente si el número de espiras colocado es más o menos correcto, es comparar el bobinado construído con otro existente, que pertenezca a la misma máquina, ya sea por pesada, por tamaño, o utilizándolos como secundarios de un transformador improvisado, cuyo primario se alimenta con corriente alternada de baja tensión (ver fig. 159). Conectando un voltímetro en los bornes del secundario (bobinado de campo), debe indicar aproximadamente la misma tensión para los dos bobinados, el modelo y el nuevo.

El núcleo de este transformador debe poderse abrir, por lo que debe ser construído con bisagras, o del tipo "tenaza", pudiendo tener el bobinado primario en la otra rama para que no estorbe en la colocación del campo en estudio.

Cualquiera que sea la forma de apreciar el número de espiras, o verificarlo después de terminado el bobinado, queda a criterio del bobinador el método a seguir, pues el caso es confeccionar un campo igual a otro que se tiene como modelo. De manera que no insistiremos en este detalle, para pasar a hacer una revisión general del método de cálculo de devanados de campo, cuando o se tiene más referencia que el tamaño o la potencia del motor o generador.

Máquinas nuevas o modificadas

El criterio general de cálculo puede seguir dos caminos distintos: uno, que consiste en fijar un flujo magnético total necesario para que el generador suministre una tensión inducida dada, o, si es un motor, una cupla girante preestablecida; y el otro, que supone ya calculado el flujo y dimensionada la máquina en base a él, con lo que se tendrán las secciones de las partes metálicas en concordancia con el tipo de material, quedando sólo como incógnita el número de amper-vueltas necesarios en los inductores, para producir tal flujo.

El primer criterio, es propio del diseño de nuevos tipos de máquinas, correspondiendo pues, a la fábricas y no al bobinador electricista, por lo que lo dejaremos de lado. Es un procedimiento sumamente engorroso, que obliga a disponer de curvas de saturación de cada uno de los materiales que entran en juego y dimensionar a su vez todos los elementos del circuito magnético. En las fábricas se tienen datos estadísticos tomados de una serie de fabricaciones anteriores, por lo que se simplifica la tarea del proyectista.

El segundo criterio, que toma como base el generador o motor ya dimensionado, es más frecuente en los talleres de bobinajes y se presenta cuando se desea cambiar las características de una máquina existente, o cuando se dispone de un motor o generador sin devanados por haber sido destruídos los que tenía.

Se trata entonces, de suponer un valor para la inducción magnética en cada parte del circuito magnético, aceptando que el mismo está bien diseñado por la fábrica de origen, lo que es bastante seguro. Tomando algunas de esas dimensiones, es posible determinar aproximadamente la cantidad necesaria de Amper-vueltas que deben tener los devanados inductores para reproducir la cantidad total de flujo magnético que había en el diseño original.

El problema queda limitado entonces, al de un circuito magnético algo complejo, cada una de cuyas partes necesitará un cierto número de Amper-vueltas, que deberán sumarse para tener el número total, y luego, adoptando un valor de la intensidad de corriente de excitación resulta el número de espiras que deben tener las bobinas.

Determinación del número de Amper-vueltas

Es sabido que una bobina recorrida por una corriente eléctrica genera en el interior de ella un campo magnético, cuya intensidad depende del producto de la cantidad de espiras por la intensidad de la corriente que recorre el bobinado. Se puede entonces, tener un campo magnético de cierta densidad con muchas espiras e intensidad reducida, o con pocas espiras e intensidad grande. Al producto de ambas cantidades, Amper por vueltas, se lo denonina Amper-vueltas, y una vez conocido se puede elegir la bobina en la forma conveniente, variando uno de los dos factores que lo forman.

Para este primer paso del diseño de los campos inductores, no tendremos en cuenta por lo dicho más arriba, ni el valor de la intensidad ni el número de espiras, sino que obtendremos solamente su producto, con el que se encontrarán después las otras dos cantidades que interesan.

Consideremos la figura 160, que muestra una parte del circuito magnético de una máquina eléctrica, sin interesar por el momento, si se trata de un motor o un generador. Se han indicado las dimensiones que hace falta conocer, es decir, el largo medio magnético entre dos polos sucesivos de la carcasa, l_c; el largo magnético del polo o masa polar, l_p; el largo medio magnético en el inducido o rotor, l_i; la misma medida de la expansión polar, l_x, y el del entrehierro, es decir, del espacio de aire que está comprendido entre el rotor y el estator, en sus partes más próximas, l_e; todas las medidas mencionadas se deben tomar en centímetros.

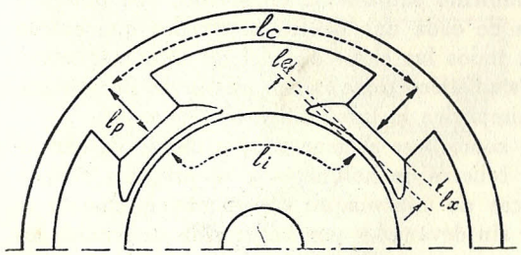

FIG. 160. — Circuito magnético comprendido entre dos masas polares.

Tomaremos para el cálculo, la cifra básica de Amper-vueltas por centímetro de longitud magnética media de cada tramo, la que se obtiene de las cifras de inducción admisible, o límite de saturación para cada tipo de material férreo, o para el aire en el caso del entrehierro. Estos datos se encuentran en las curvas de imantación de los materiales ferromagnéticos, que son numerosas, por lo que no es posible incluirlas en esta publicación, limitándonos entonces, a sacar de las mismas las cifras que interesan.

Separemos el circuito magnético en las partes distintas de que se compone:

Carcasa.

Si es de fundición, se toman cifras de inducción magnética de 6000 a 7000 líneas por centímetro cuadrado de sección transversal, y si es de acero, el doble de las cifras anteriores. Suponiendo este último material, la cantidad de Amper-vueltas por centímetro de longitud será aproximadamente 7 a 8 y la cantidad de Amper-vueltas debe ser:

$$Av = 8 \times l_c$$

tomando, como se dijo, la longitud indicada en la figura 160, en centímetros, y siendo esta cifra Av, uno de los sumandos que irá al cálculo definitivo de los Amper-vueltas totales necesarios.

Polos o masas polares.

Si son de fundición, se tomarán las mismas cifras de inducción que se dieron para la carcasa, pero si como es más común, son de acero o hierro dulce, el límite de saturación está alrededor de las 15.000 a 17.000 líneas por centímetro cuadrado de sección transversal. Con esto, la cantidad de Amper-vueltas por centímetro será de 50 aproximadamente y en cifras medias; la cantidad necesaria, por tratarse de dos polos, se ha multiplicado por 2. Resulta que hacen falta, para la longitud de la masa polar:

$$Av = 50 \times l_p$$

Expansiones polares.

Se supone que son del mismo material que los polos, por lo que las cifras de inducción y de Amper-vueltas unitarias serán idénticas, teniéndose:

$$Av = 50 \times l_x$$

Inducido o rotor.

Para el cálculo aproximado del circuito magnético del inducido, no se tomará en cuenta su periferia dentada, puesto que resultaría engorroso considerar la saturación de los dientes. Supondremos que está construído de chapa laminada, cuya inducción límite oscila entre 15.000 y 17.000 líneas, pudiendo llegar en las zonas de las cabezas de dientes a valores de 20.000 líneas. Los Amper-vueltas unitarios son más o menos 10, con lo que se necesitarán en total:

$$Av = 10 \times l_i$$

Estamos ahora en condiciones de obtener el número total de Amper-vueltas para la parte metálica del circuito magnético. Falta considerar el entrehierro.

Entrehierro.

La inducción magnética en la zona de aire comprendida entre las masas polares y el rotor, puede tomarse entre 5.000 y 10.000 líneas por centímetro cuadrado de sección transversal. La cantidad de Amper-vueltas unitarios resulta entonces comprendida entre 8.000 y 16.000 por centímetro de longitud, y de esta cifra depende en su mayor grado la cantidad total de Amper-vueltas inductores. Para esta sección del circuito se tomará. pues:

$$Av = 8000 \times l_e$$
$$\text{a } 16.000 \times l_e$$

siendo la cifra media, para cálculos rápidos:

$$Av = 12.000 \times l_e$$

Sumando las cantidades necesarias para cada una de las partes del circuito magnético, se tiene la cantidad total.

Aclaremos esto con un ejemplo numérico. Supongamos que las dimensiones indicadas en la figura 160, medidas en una máquina real, resulten:

longitud magnética de la carcasa	$l_c = 30$	cm.
„ „ „ los polos	$l_p = 5$	„
„ „ „ las expansiones . . .	$l_x = 2$	„
„ „ del inducido	$l_i = 15$	„
„ „ „ entrehierro	$l_e = 0{,}05$	„

Las cantidades de Amper-vueltas resultan, tomando las cifras medias dadas:

$$\begin{aligned} 8 \times 30 &= 240 \\ 50 \times 5 &= 250 \\ 50 \times 2 &= 100 \\ 10 \times 15 &= 150 \\ 12.000 \times 0{,}05 &= 600 \\ &\hline 1.340 \end{aligned}$$

es decir, que hacen falta 1.340 Amper-vueltas para todo el circuito inductor, en la máquina cuyas dimensiones se han tomado.

Hasta ahora no se ha tomado en cuenta la reacción de la armadura o rotor, que debilita el campo magnético, por lo que se deberá aumentar la cifra teórica en un 20 a 30 %, para tener en cuenta este detalle. Tendremos, entonces, finalmente:

$$\text{Av totales} = \text{Av teóricos} + 0{,}2 \times \text{Av teóricos}$$

o, lo que es lo mismo:

$$\text{Av totales} = 1{,}2 \times \text{Av teóricos}$$

En el ejemplo numérico anterior se necesitarán entonces, en total:

$$1.340 \times 1{,}2 = 1.608 \text{ Amper-vueltas}$$

como mínimo, y

$$1.340 \times 1{,}3 = 1.742 \text{ Amper-vueltas}$$

como máximo, para tener en cuenta el debilitamiento del campo.

El número total de Amper-vueltas de los bobinados inductores es sumamente importante para poder calcular la cantidad de espiras que deben llevar. Para ello se debe considerar el tipo de excitación que tiene la máquina, que puede ser en serie, en derivación o mixta (compound).

Máquinas con excitación en serie

Todos los bobinados de los campos inductores se conectan en serie con el inducido, con lo que pasará por aquéllos la corriente principal que está indicada entre las características, o puede ser calculada conociendo la potencia y la tensión que se mide entre los bornes. Los inductores resultarán así de pocas espiras y de conductor de gran sección, la que será calculada en función de la circulación de corriente, y a una densidad admisible en el alambre del bobinado.

Si no se conoce la corriente normal de carga en el generador serie, o la corriente normal de consumo en el motor con excitación en serie, se la puede calcular, para lo cual basta saber la potencia normal de la máquina. Sea esta potencia P, expresada en Kilowatt, y supongamos que la tensión entre bornes sea normalmente E en Volt; la corriente normal será:

$$I = \frac{1000\,P}{E}$$

que resulta dada en Amper.

Así por ejemplo, si la máquina es de una potencia de 10 Kilowatt y para una tensión normal de 220 Volt, la corriente resulta ser:

$$I = \frac{1000 \times 10}{220} = 45{,}45 \text{ Amper}$$

A veces, se conoce la potencia expresada en C.V. en lugar de Kilowatt, por lo que se la deberá reducir previamente a esta última unidad multiplicando por 0,736, o si no se aplica la fórmula corregida para hallar la intensidad:

$$I = \frac{736\,P}{E}$$

en la que la potencia P estará expresada en C.V., la tensión E en Volt y la intensidad I resultará también en Amper.

Conocida la intensidad, resulta fácil determinar el número de espiras de los campos inductores, pues se dispone de la cantidad de Amper-vueltas. En efecto, el número de espiras será:

$$n = \frac{Av}{I}$$

es decir, por simple cociente entre la cantidad de Amper-vueltas y la intensidad de régimen.

En el ejemplo dado anteriormente para el cálculo de inductores, se tenían alrededor de

1.800 Amper-vueltas ·

y tomando la intensidad de corriente, dada en el ejemplo de más arriba de

45,45 Amper, resulta una cantidad de vueltas, dividiendo 1800 por 45,45 de más o menos:

40 espiras

que deberán repartirse entre los dos devanados inductores que se tomaron en cuenta para el cálculo. Si se trata por ejemplo, de una máquina de cuatro polos en serie, se tendrá que hay dos circuitos magnéticos iguales con 20 espiras para cada polo, o sea 2 ramas magnéticas de 40 espiras. Y así sucesivamente, 20 espiras para cada polo si es una máquina bipolar, etc.

La densidad de corriente admisible en los devanados de máquinas eléctricas, se limita a 1,4 a 2,3 Amper por milímetro cuadrado, siendo la cifra mayor para máquinas pequeñas y la menor para las grandes. En el ejemplo dado más arriba, tomaremos 2 Amper por milímetro cuadrado, con lo que hará falta una sección del conductor de:

$$\frac{41{,}45}{2} = \text{aprox. 23 milímetros cuadrados.}$$

Máquinas con excitación en paralelo o derivación

Los campos inductores se conectan en paralelo con el devanado del inducido, es decir, en paralelo con las escobillas, con lo que la corriente del circuito de excitación puede ser menor que la corriente principal de carga en forma apreciable.

Para calcular la corriente del circuito inductor se considera que todos los campos estarán en serie entre sí, es decir que en una máquina bipolar se tendrán

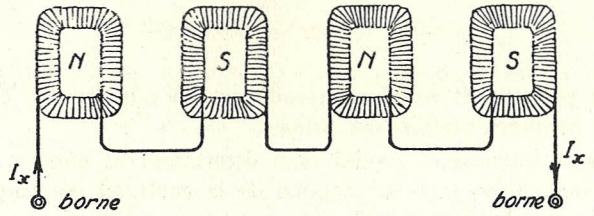

Fig. 161. — Conexión de los inductores en una máquina de cuatro polos.

dos bobinados en serie entre sí, estando ambos a su vez unidos por sus extremos a las escobillas. Para una máquina tetrapolar, se tendrán cuatro bobinados inductores en serie y unidos a su vez a los bornes exteriores.

Se debe cuidar el sentido de circulación de corriente en cada bobinado, para tener la polaridad magnética conveniente. La figura 161 aclara esto, notándose que la serie se hace cruzando las conexiones para cada bobina, es decir, uniendo la salida interior de una con la entrada interior de la otra y así sucesivamente.

Para calcular la intensidad conveniente del circuito inductor, en una máquina excitada en derivación, se puede aplicar la fórmula:

$$S = \frac{p\,L\,Av}{10.000\,E}$$

que da la sección del conductor del bobinado de campo, y siendo p el número de polos (2, 4, etc.); L es el largo de la espira media de cada campo, que está aclarado en la figura 162, tomado en centímetros; Av son los Amper-vueltas calculados en la forma como se vió. E es la tensión de servicio en los bornes, dada en Volt y S es la sección del conductor en milímetros cuadrados.

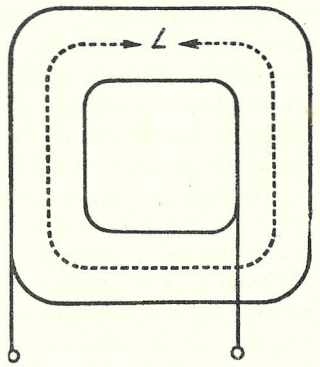

Fig. 162. — Indicación de la longitud de la espira media en un bobinado de campo.

Por ejemplo, para el caso numérico propuesto anteriormente se tenían 1.800 Amper-vueltas, y suponiendo que se trata de una máquina tetrapolar (p = 4) para 220 Volt, con un largo medio de la espira de cada inductor de 34 centímetros (esta medida se debe apreciar en las masas polares teniendo en cuenta el espacio disponible y la dimensión del núcleo de los polos), se tendrá que la sección necesaria será:

$$S = \frac{4 \times 34 \times 1800}{10.000 \times 220} = \text{aprox. 0,12 mm. cuadrados.}$$

Conocida la sección, se adopta una densidad de corriente que, al igual que en casos anteriores, debe estar comprendida entre:

1,5 a 2,5 Amper por milímetro cuadrado.

Tomando por ejemplo, 2 Amper por milímetro cuadrado, resulta una intensidad de excitación de:

$$0{,}12 \times 2 = 0{,}24 \text{ Amper.}$$

Con lo que puede calcularse el número de espiras, pues se conoce la cantidad de Amper-vueltas:

$$n = \frac{Av}{I}$$

resultando, para el ejemplo propuesto:

$$n = \frac{1800}{0{,}24} = 7.500 \text{ vueltas}$$

a repartir entre dos polos, es decir, que cada polo de la máquina tendrá 3.750 espiras, y como es tetrapolar, se bobinarán cuatro polos de 3.750 vueltas

cada uno, con alambre de 0,12 milímetros cuadrados de sección, es decir, de 0,4 milímetros de diámetro, aproximadamente.

Máquinas con excitación mixta o compound

Se trata de una combinación de los casos anteriores, es decir, tendrá campos en paralelo y campos en serie. Si se trata de generadores, los campos en serie se conectan de modo que su flujo magnético se sume al del campo derivación, teniendo aproximadamente un 30 % de los Amper-vueltas de éste. Si se trata de motores compound, el campo serie se conecta casi siempre restando sus efectos de los del campo derivación, teniendo aproximadamente la misma proporción de Amper-vueltas.

Un caso particular es el de las máquinas para soldadura eléctrica, que a pesar de ser generadoras se busca una gran corriente de cortocircuito, por lo que se suele conectar el campo serie en oposición de efectos del campo derivación, pero dándole mayor cantidad de Amper-vueltas al primero, que en los generadores comunes. El efecto obtenido es que se tiene una mayor corriente de cortocircuito (que es el caso de funcionamiento normal del equipo de soldadura) que en las máquinas derivación, sin llegar a los valores excesivos que toma tal intensidad en las excitadas en serie.

El cálculo del número de Amper-vueltas para el devanado derivación se hace en la forma normal vista hasta aquí, y el campo serie se diseña tomando al otro campo como base, asignándole una proporción de Amper-vueltas con respecto al primero y calculando después los números de espiras de los dos.

No insistiremos pues en esto, pues se trata de una repetición de ejemplos ya dados. No hay, prácticamente, ninguna diferencia entre los dos casos de compound llamados corto y largo, pues las diferencias eléctricas que se producen no alteran fundamentalmente el sistema de cálculo. A lo sumo, se tendrá que hay variaciones de un 5 %, que en la práctica resultan despreciables, por lo menos en lo que se refiere al cálculo de los devanados inductores, que se apoya según se vió, en cifras empíricas.

CONEXIONES RELATIVAS DE LOS CAMPOS

Los bobinados de campo de una máquina deben ser ubicados en las masas polares, y conectados de forma tal que se tengan los sentidos correctos previstos para el campo magnético. Debe ponerse especial cuidado en esto, porque no se obtendrá funcionamiento hasta no cumplir con tal requisito.

Para determinar cuál será el sentido de las líneas de fuerza en un bobinado, se puede emplear la regla práctica del tirabuzón, que es valioso auxiliar en estos casos.

Si se imagina girando un tirabuzón en el sentido de circulación de la corriente en los conductores de la bobina, él avanzará en el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético. Hay que considerar, en cada caso, el

sentido en que se ha efectuado el bobinado, conviniendo marcarlo para evitar errores, y el sentido de entrada y salida de corriente en la bobina, para poder aplicar esta regla.

Consideremos por ejemplo, el caso de una máquina de cuatro polos, sea un motor o un generador, como la ilustrada en la figura 163. De acuerdo con lo visto anteriormente, los campos Norte y Sud están ubicados en la forma normal, y se los ha dibujado en la figura en la posición relativa que ocuparán en la carcasa.

En cada campo hemos marcado el sentido del bobinado. y los terminales

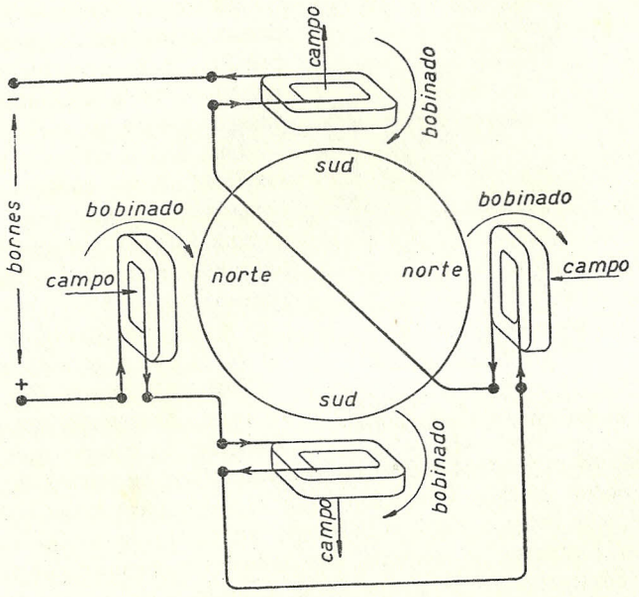

Fig. 163. — Esquema de conexiones de los cuatro campos de una máquina tetrapolar.

de entrada y de salida del conductor, es decir, los dos trozos inicial y final del devanado, que son respectivamente, los terminales interiores y exteriores.

Sabiendo cuál debe ser la polaridad magnética que corresponde a cada campo, se ha indicado con una flecha el sentido que deben tener las líneas de fuerza del campo.

El problema consiste en determinar cuál debe ser el sentido de circulación de la corriente en cada bobina, para obtener un campo magnético de las direcciones marcadas. Se resuelve aplicando la regla del tirabuzón ya mencionada.

Se hace girar el tirabuzón de manera que avance en el sentido de las flechas que señalan el campo, y se observa cuál es el giro de la manija del mismo al moverlo. Ese sentido debe coincidir con el de circulación de la corriente, que en la figura hemos indicado con flechas.

Resta ahora conectar entre sí los campos, para que la corriente de excitación siga un circuito cerrado y siempre en un mismo sentido. Las conexiones marcadas en la figura dan la solución propuesta, que no es la única, pues basta unir la salida de corriente de una bobina con la entrada de otra, para obtener el mismo resultdo.

La serie así formada se debe unir a los bornes de la máquina, respetando la polaridad indicada en la figura, es decir, se unirá el borne positivo al terminal de la serie que corresponde a la entrada de corriente a los campos, y el negativo al de salida.

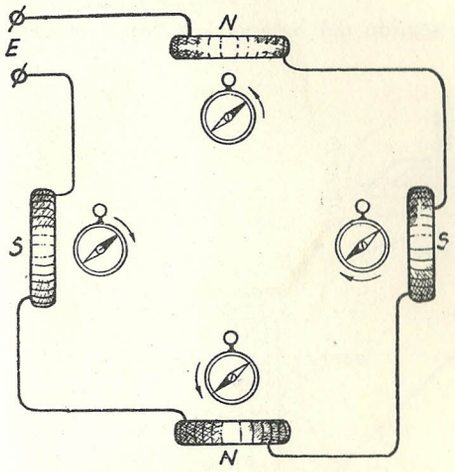

Fig. 164. — Determinación de la polaridad magnética de los campos con la brújula.

En forma similar se resuelven los demás casos que se presenten en la práctica, para generadores y motores bipolares o multipolares, y con cualquier tipo de excitación.

Una forma práctica y rápida de verificar si los campos están bien conectados, es mediante el auxilio de una brújula, acercándola a cada bobinado inductor. La brújula es un pequeño imancillo, de modo que su polo norte será repelido por el norte del bobinado y atraído por el sur.

Veamos la figura 164 que aclara lo dicho. Acercando una brújula al bobinado de campo que está colocado en el inductor y conectado en la red respectiva, se notará la desviación de la aguja en un sentido. Conviene quitar el rotor para hacer esta verificación. Corriendo la brújula hasta el bobinado inmediato, la aguja debe desviarse en sentido contrario, y siempre, dos inductores vecinos deben provocar desviaciones contrarias en la aguja de la brújula. Esta operación demanda muy escaso tiempo y da la seguridad de que se han hecho correctamente las conexiones de los diversos bobinados inductores. No es necesario que la tensión aplicada sea la total normal, pues puede ser menor.

CAPÍTULO XI

BOBINADO DEL INDUCIDO

Es fácil imaginar que en cuanto se obtuvo una f.e.m. inducida en una espira girante en un campo magnético, se pensó en aumentar el número de aquellas para obtener tensiones mayores. Surgió así el inducido en anillo de Pacinotti, en el que se arrollaba un conductor continuo alrededor de una corona de cilindro, o un toro circular (cuerpo que imita un anillo con sección transversal circular). Estaba construído con el correspondiente colector, y las escobillas se situaban en la línea neutra, es decir, en la línea perpendicular al eje de polos en la máquina bipolar, y sobre las bisectrices de los dos ejes de polos en las tetrapolares.

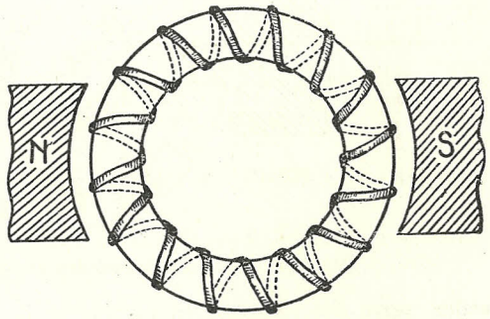

Fig. 165. — Vista esquemática de un inducido en anillo.

El inconveniente de este tipo de inducido salta a la vista; como la generación de corriente inducida se produce al cortar el conductor al campo magnético, se puede observar en la figura 165 que sólo cortarán el campo los trozos del conductor que están situados en la periferia del anillo, en la parte exterior del mismo.

En efecto, las líneas de fuerza del campo magnético salen de la masa polar norte, atraviesan el entrehierro y entran al núcleo anular del inducido, para dirigirse por él a la otra masa polar, la sur, pasando por el entrehierro del otro extremo. En todo este recorrido, no son cortadas más que por los trozos de conductores que pasan por el entrehierro, siendo inútil por lo tanto, todo el resto del conducctor, que es en la figura la parte del frente, la de atrás y la interior del anillo.

Otro de los inconvenientes que presentaba el devanado en anillo, era que había que bobinarlo a mano y en la máquina misma, mientras que en los modernos inducidos a tambor, como los conductores se colocan en la periferia, se pueden preparar las bobinas aparte y colocarlas después de hechas.

Además, el hecho que en la parte interna del anillo debía haber conductores aislados, dificultaba la sujeción del inducido al eje, lo que no sucede en los de tambor, puesto que los conductores activos están colocados únicamente en la parte exterior.

Los inducidos en anillo han pasado pues, a tener sólo significación histórica, siendo desplazados totalmente por los del tipo en tambor, a los que dedicaremos el estudio restante sobre el tema.

DEVANADOS DE INDUCIDO EN TAMBOR

Los inducidos de este tipo están constituídos por un cilindro macizo de chapas de hierro, aseguradas entre sí mediante bulones, y en cuyo contorno tiene una serie de ranuras longitudinales para colocar dentro de ellas a los conductores activos. La figura 166 ilustra un corte esquemático, en el que

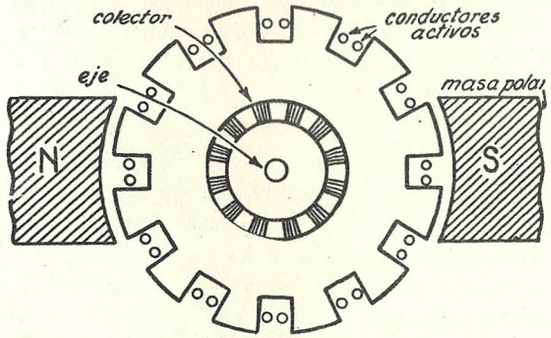

Fig. 166. — Vista esquemática de un inducido en tambor.

pueden verse las ranuras, en cada una de las cuales hay dos conductores (veremos después que no siempre hay dos solos); el colector, cuyas conexiones con el inducido se verán más adelante, y las masas polares.

Se podrá observar que todos los conductores están ubicados de tal manera, que cortarán al campo magnético, sin trozos inútiles, salvo las conexiones frontales. Los conductores forman espiras cerradas, de manera que algunos de los que aparecen en el corte serán los lados iniciales de una espira y otros los finales. Es muy común que de los dos conductores que hay en una ranura, uno sea el comienzo de una espira y el otro el final de una espira distinta.

Todo el devanado se hace cerrado, es decir, con recorrido continuo en el tambor, pero las bobinas quedan abiertas sobre dos delgas, contiguas o no, del colector. Veremos que la forma más sencilla de representar el conjunto completo del devanado, con las conexiones a las delgas del colector y la posición

de las escobillas sobre éste, es la forma desarrollada, que se consigue imaginando un papel envuelto alrededor del inducido, y desarrollado después sobre un plano, habiéndose dibujado mientras estaba arrollado, las ranuras, los conductores y las conexiones frontales, de modo que se puede observar con facilidad al conjunto.

Clasificación de bobinados

Los conductores que forman el bobinado se alojan pues en las ranuras del inducido o rotor, y se forman así las bobinas. Cada bobina está constituída por un conductor o alambre que parte de una delga del colector y va a una ranura del rotor, sale de ella y va a otra, y después de dar varias veces el recorrido entre esas dos ranuras, vuelve a otra delga del colector, que puede ser contigua o no con la de partida. Como las ff.ee.mm. inducidas en los lados de la bobina deben sumarse entre sí para tener la f.e.m. total, esos lados deben estar bajo polos distintos. La figura 167 nos aclara lo dicho. Si el lado 1 de la bobina tiene una f.e.m. inducida con polaridad positiva arriba, el lado 2 debe tener su polo positivo debajo, para que quede correctamente en serie con el lado 1. De este modo, cada vuelta o espira de la bobina suma su f.e.m. a las demás y tendremos en toda la bobina el valor total de la f.e.m. de la máquina.

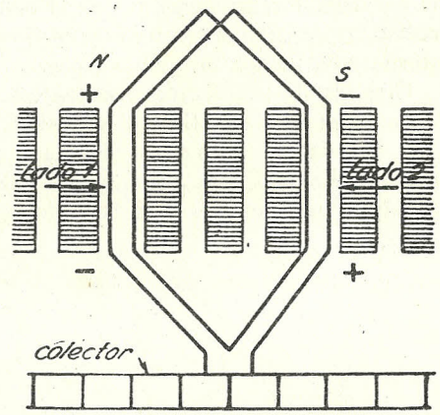

Fig. 167. — Para sumar las ff.ee.mm. los lados de bobina deben estar bajo polos distintos.

Según la conexión de los dos extremos finales de cada bobina al colector, los bobinados se clasifican en dos grandes grupos: *imbricados* y *ondulados*.

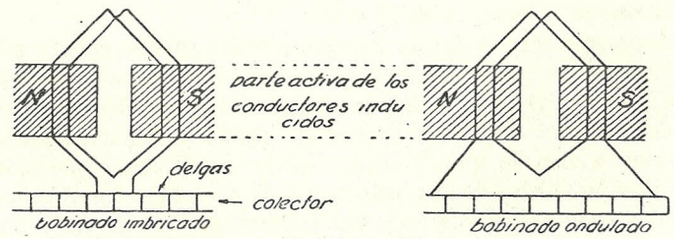

Fig. 168. — Los dos tipos principales de bobinados de inducido.

La figura 168 muestra los dos tipos y allí puede verse cuál es la diferencia, que no afecta a la bobina en sí sino a la conexión de sus extremos al colector.

En el bobinado imbricado se parte de una delga del colector y después de dar todas las vueltas que forman la bobina, usando dos ranuras del rotor, se vuelve a la delga contigua del colector. De ésta se parte para hacer la segunda bobina y así siguiendo.

En el bobinado ondulado el fin y principio de la bobina se conectan a delgas no contiguas del colector, aunque en las máquinas de dos polos puede ocurrir que sí lo sean, ya que el final de la bobina, al conectarla dando toda la vuelta al colector, puede caer al lado de la delga a la que estaba conectado el principio de aquella.

Una clasificación más correcta es decir que en el bobinado imbricado las dos cabezas, anterior y posterior de cada bobina quedan de un mismo lado del eje del rotor, mientras que en el ondulado quedan en lados opuestos. Esas cabezas se refieren a los terminales de cada bobina, y no a ella misma, que sabemos son iguales en ambos tipos.

Otro detalle de índole constructiva que permite hacer una clasificación de los bobinados se refiere a la posición recíproca de las delgas de arranque y de llegada en el colector. Tenemos así los bobinados *no cruzados* y los *cruzados*. En la figura 168 los dos bobinados elementales representados son "no cruzados" y en la figura 169 vemos los tipos "cruzados". Claro que mientras no se coloque la bobina en el rotor no es fácil notar si pertenece a uno de los dos tipos, aunque en el imbricado, el cruce de los terminales de la bobina debe moldearse un poco y ya ello es un indicio. En los ondulados no se puede notar nada hasta su colocación en el rotor.

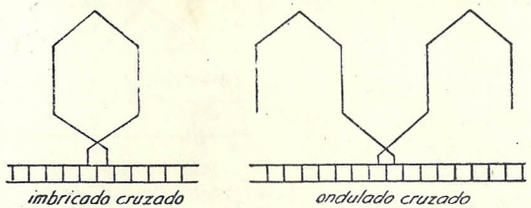

FIG. 169. — Los bobinados pueden ser ejecutados "no cruzados" como en la figura 168 y "cruzados" como se ven en esta figura.

Hay todavía una tercera forma de clasificación, que se refiere a la colocación de las bobinas en las ranuras. En el diseño del bobinado, atendiendo a la cantidad de ranuras disponibles para alojarlo en relación con el número de delgas del colector, puede ser necesario colocar en cada ranura un solo lado de bobina o más de uno. Tenemos así la clasificación que muestra la figura 170. Hay bobinados de *una sola capa* y de *dos capas*. En el primer caso, poco frecuente, cada ranura del rotor aloja solamente un lado de bobina y en el segundo van dos o más. En el bobinado más generalizado en máquinas chicas y medianas, en cada ranura van dos lados de bobina, correspondiendo siempre al lado 1 arriba y el 2 abajo o viceversa. Al ejecutar el bobinado se colocan primero todas las bobinas por uno solo de sus costados, el que va en el fondo

de la ranura, y luego se van colocando los lados que quedan en la parte superior de las ranuras.

Los bobinados en doble capa pueden tener más de un lado de bobina por capa, como se ve en la tercera ilustración de la figura 170, en que hay tres lados por capa. Sobreentendido que estos bobinados no se encontrarán en máquinas pequeñas.

Finalmente, es posible hacer otra clasificación de bobinados, atendiendo al ancho que abarcan en la periferia del rotor, en relación con el ancho polar, o distancia entre ejes de polos contiguos. Se habla de bobinas *diametrales* y *no diametrales* o de paso reducido. En la figura 171 puede verse la diferencia entre los dos tipos para una máquina de cuatro polos, porque la palabra diametral no se refiere al círculo sino que se considera como un diámetro al paso polar. El bobinado de la primer figura tiene por ancho de bobina o paso justo una cuarta parte del círculo, y entonces decimos que el bobinado es diametral.

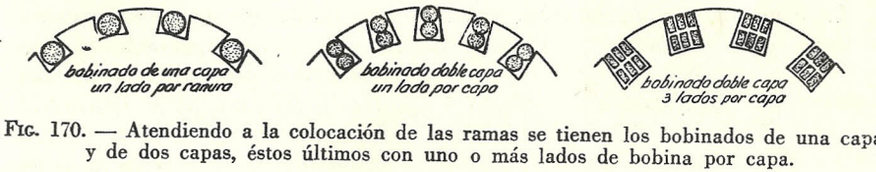

FIG. 170. — Atendiendo a la colocación de las ramas se tienen los bobinados de una capa y de dos capas, éstos últimos con uno o más lados de bobina por capa.

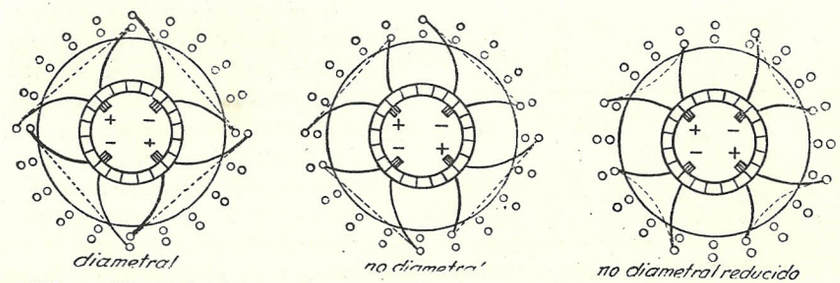

FIG. 171. — Ejecución diametral y no diametral de bobinados, el tercero de los cuales es de paso reducido.

Cuando el ancho del bobinado es mayor o menor que la medida diametral, se lo denomina "no diametral". Generalmente se toma la dimensión menor que la diametral, y la reducción puede ser pequeña, como en la segunda ilustración o grande, como en la tercera de la figura 171.

Pasos elementales o de bobina

Como una espira está compuesta por un conductor de ida y otro de vuelta en la periferia del inducido para que se sumen las fuerzas electromotrices hemos dicho que es necesario que los dos lados de la bobina estén bajo masas polares de distinta polaridad, así se inducirán corrientes de sentidos contrarios,

y recorrerán en forma continua la bobina. Vimos, para aclarar lo dicho, la figura 167. Para el trazado del bobinado interesa especialmente ocuparnos del paso. La distancia entre los dos lados mencionados de la bobina se llama *paso elemental* o de *bobina*, y_1, y está indicado en la figura.

Si el devanado es del tipo que hemos llamado "imbricado" el conductor debe dirigirse ahora hacia la delga inmediata de donde partió, cumpliendo un paso de vuelta que debe ser, lógicamente, algo menor que el de ida, esto es, el paso *elemental* y_2, también indicado en la figura. Resulta que los pasos elementales deben ser iguales o casi iguales al *paso polar*, que es la distancia entre los ejes de dos polos consecutivos.

La distancia que media entre los comienzos de dos bobinas consecutivas, se llama *paso resultante*, *y*. En este detalle difieren fundamentalmente los devanados imbricados y ondulados. El bobinado de la figura 172 es imbricado, y en ellos, el paso resultante es la diferencia entre los dos pasos elementales, es decir:

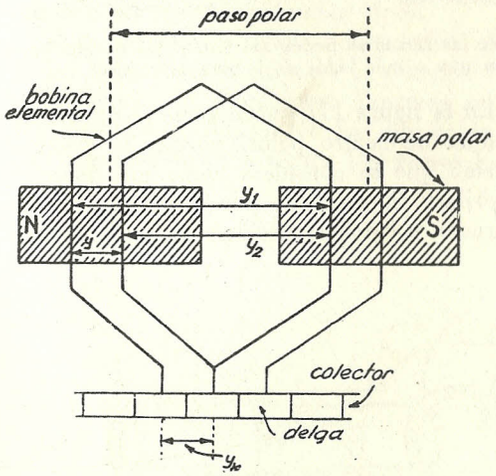

FIG. 172. — Indicación de los pasos en un bobinado imbricado o paralelo.

$$y = y_1 - y_2$$

Sobre el colector, también habrá un paso que es la distancia entre dos conexiones sucesivas, correspondientes a dos bobinas inmediatas eléctricamente, es decir, dos bobinas que se suceden en el recorrido de la corriente. Es el *paso del colector*, y_k, que en el caso de los devanados imbricados es reducido (muy comúnmente igual a uno), siendo igual a 1 en la figura.

Los pasos se acostumbra a medirlos por cantidad de elementos, en lugar de las distancias angulares respectivas, es decir que los pasos de bobina se omarán como cantidades de conductores que se encuentran sucedidos en la periferia, avanzando en un sentido determinado a lo largo de la misma; el paso polar se medirá como una cantidad de ranuras del inducido, y el de colector, como una cantidad de delgas de aquél.

La figura 173 representa esquemáticamente el principio de ejecución de los devanados ondulados. Se puede ver que, si bien el primer paso elemental y_1 puede ser igual al de un bobinado imbricado, tal segundo paso de bobina se hace en avance, en lugar de retroceso como en aquéllos. El paso resultante será pues, la suma de los dos pasos elementales, es decir:

$$y = y_1 + y_2$$

y como cada paso elemental es casi igual al paso polar (se verá oportunamente

por qué no puede ser exactamente igual), el paso resultante será casi el doble del paso polar, o sea, abarcará una distancia cercana a la que hay entre los centros de dos polos no consecutivos. La figura tiene indicados los dos pasos elementales y el resultante.

El paso del colector es, en estos devanados, grande, pues el comienzo

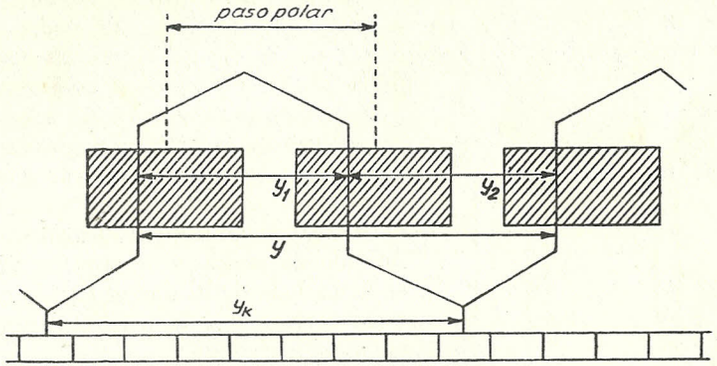

FIG. 173. — Indicación de los pasos en un bobinado ondulado o serie.

y fin de una bobina no se conectan a delgas contiguas del colector, como en los imbricados.

Veremos más adelante la aplicabilidad de los dos tipos de bobinados, pues habiendo una diferencia tan marcada en la forma de ejecutarlos, deberá haber también diferencias en las características.

Paso polar

Es como ya se dijo, la distancia entre los ejes de dos masas polares sucesivas, medido como una cierta cantidad de ranuras en el inducido. En las máquinas bipolares, este paso es geométricamente de 180° y traducido a número de ranuras, será exactamente la mitad de las que tenga la periferia del rotor.

En las máquinas tetrapolares el paso polar será, en números, la cuarta parte del total de ranuras que tenga el inducido, y así sucesivamente.

Paso de colector

Es el número de delgas que median entre las conexiones de comienzo y fin de una bobina, dado directamente por tal cantidad. Conviene aclarar que no siempre el número de delgas del colector es igual al número de ranuras del inducido, de modo que el paso del colector no es necesariamente igual al paso resultante medido sobre las ranuras del rotor, y hasta se encuentran bobinados que, como hay pocas delgas de colector, no tienen conexión de todos los comienzos y fines de bobinas a delgas del mismo.

Elementos de un bobinado

La bobina elemental de un devanado no está formada necesariamente por un conductor de ida y otro de vuelta, sino que tiene varias espiras completas antes de ser conectada a la delga correspondiente del colector.

Al construirla, se la arrolla sobre formas especiales de madera, según ilustración de la figura 174. Es un molde desarmable para poder retirar la bobina terminada, una vez dado el número de vueltas necesarias alrededor de la misma, y dejando el comienzo y fin de la bobina para la conexión a las delgas respectivas del colector. Terminada la bobina, se la envuelve totalmente con cinta de algodón, arrollando la misma alrededor del haz de alambres que forman cada uno un lado de espira, y de aquí en adelante, se llama lado de bobina al haz de conductores activos que forman el paquete de alambres envueltos.

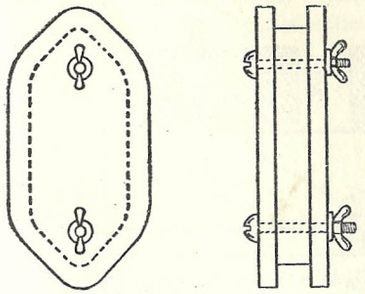

FIG. 174. — Molde para hacer las bobinas del inducido.

La bobina terminada se trata como si fuera un conductor único para los cálculos, y para su colocación en las ranuras del inducido. La figura 175, aclara lo dicho, mostrando la forma esquemática de una bobina de un arrollamiento imbricado, a la izquierda, y un ondulado a la derecha, compuestas por tres espiras elementales cada una (no se han dibujado bobinas de más espiras para evitar la complicación del dibujo, y no porque no tengan más en la práctica).

Nótese que la bobina terminada, cuando está sin conectar, no se diferencia si es de un bobinado imbricado o de uno ondulado, pues los trozos

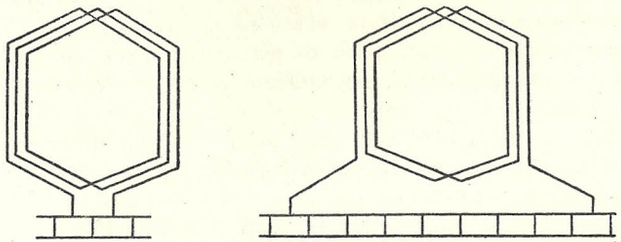

FIG. 175. — Bobinas elementales de devanados imbricados y ondulados.

de conductor terminales se pueden doblar hacia adentro o hacia afuera, según el tipo de devanado de que se trate. Más adelante veremos que esto sólo se cumple para máquinas bipolares, en las que las bobinas para arrollamiento serie o paralelo (ondulados e imbricados, respectivamente) tienen el mismo aspecto.

La figura 176 muestra un croquis con varias bobinas terminadas conectadas al colector; la parte *a* corresponde a un bobinado imbricado y la parte *b* a uno ondulado. En ambos esquemas se indica el paso de colector y_k para apreciar la diferencia entre los dos sistemas clásicos de bobinados.

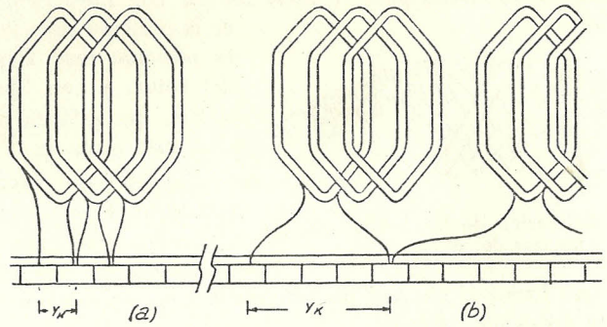

FIG. 176. — Aclaración de la forma de conectar los principios y fines de bobinas a las delgas del colector.

Nótese que a cada delga del colector se sueldan dos terminales, uno el principio de una bobina y el otro el final de la bobina subsiguiente en el circuito eléctrico.

Colocación de las bobinas en el rotor

Es común encontrar en una misma ranura del rotor el comienzo de una bobina y el fin de otra, siendo más raro que una máquina tenga en las ranuras del inducido un solo lado de bobina o más de dos lados.

Tienen en cada ranura un solo lado de bobina, cuando el diseño ha sido tal que ha resultado un número de bobinas igual a la mitad de ranuras del rotor, lo que no es frecuente.

Tienen más de dos lados de bobina por ranura, cuando el número de bobinas no es igual al de ranuras, cosa que se encuentra a menudo en la práctica, especialmente para máquinas de rotores de diámetros pequeños para la cantidad de bobinas que necesitan, recurriéndose entonces a colocar en cada ranura más de dos lados de bobina, por ejemplo cuatro o seis.

Lo más usual, es que el número de ranuras sea igual al de bobinas, para máquinas comunes, debiendo entonces, colocarse dos lados de bobina en cada ranura del rotor, una debajo de la otra, denominándose el devanado de este tipo: "a doble capa".

La figura 177 muestra la forma de colocar las bobinas para este último caso, pudiendo verse que el haz de conductores que hemos llamado "comienzo" de la bobina, está siempre en la misma posición, que es la superior en la figura, y los lados "finales" están siempre en la otra posición, que en la figura es la inferior.

Puede invertirse la posición relativa, pero manteniéndola para todo el

bobinado, es decir, poner siempre los comienzos debajo y los fines arriba de los anteriores.

En los esquemas de bobinados, se acostumbra a dibujar los dos lados de bobina que están en la misma ranura, uno al lado del otro, para facilitar la comprensión de aquéllos, pero se suele indicar con línea llena el que está en la posición superior, esto es, en la posición más alejada del eje del rotor, y con línea punteada el lado que está en la parte inferior, más cerca de dicho eje.

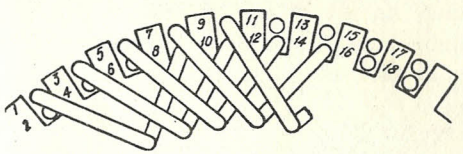

FIG. 177. — Colocación de las bobinas en las ranuras del rotor.

Además, por razones de simplicidad, el lado de bobina se representa con una sola línea, cualquiera que sea la cantidad de conductores que forme el haz del paquete, aclarando cuál es ese número, que se repite para todas las bobinas.

Obsérvense en la figura 177 los números que están al lado de todos los lados de bobinas. Ellos se reproducen en el esquema desarrollado para facilitar la fijación de los pasos que, como se dijo, se miden por un número de lados de bobina. Así, en el caso de la figura citada, el paso elemental de avance, y_1, es 7, puesto que desde el lado inicial de bobina marcado con el número 1 hay que recorrer siete lados más, para llegar al otro lado de la misma bobina. El paso elemental de retroceso, y_2, si se trata de un devanado imbricado, será probablemente igual a 5, y la bobina se conectará por el otro extremo del rotor que no se ve en la figura del lado 8 al lado 3, cumpliéndose el paso elemental 5.

El paso resultante, contado como lados de bobina, resulta así de 2, puesto que hemos pasado del lado 1 al 8, para volver al 3, siendo entonces igual a 2 el paso resultante mencionado.

Si los pasos elementales se contaron como un número de ranuras, el

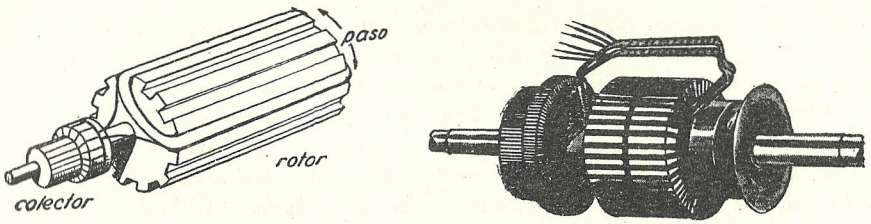

FIG. 178. — Aclaración de la forma de bobinar el inducido o rotor y vista de la colocación de las bobinas.

primer paso elemental, en el bobinado de la figura 177, sería igual a 3, el segundo, o sea el de retroceso, igual a 2, y el paso resultante igual a 1. En el diseño de devanados se aclarará sobre la forma de medir los pasos, para evitar ambigüedades, puesto que como se ha podido apreciar en el

ejemplo anterior, hay diferencias en las medidas de los pasos si se los considera aisladamente, pero desaparecen automáticamente si se fija la forma de computarlos.

La figura 178 muestra la colocación de una bobina terminada en el rotor, incluyendo las conexiones al colector. Se indica también el paso elemental de avance que es el que debe tomarse en cuenta para la ejecución de cada bobina, pues el paso de retroceso sólo se considera para hacer las conexiones al colector. Por el tipo de conexiones al colector se ve que se trata de un bobinado imbricado, pues el comienzo y final de bobina están unidos a delgas contiguas del colector.

CAPÍTULO XII

BOBINADO IMBRICADO O PARALELO

Los devanados que se construyen con dos o más ramas en paralelo, formando bucles, es decir, haciendo los dos pasos elementales en distinto sentido, se denominan *imbricados* o tipo paralelo. Se utilizan en máquinas que trabajan en tensiones no muy grandes, y sobre todo, cuando la intensidad de corriente es importante, puesto que se la puede dividir en varias ramas, conectadas en paralelo dentro de la armadura.

La característica sobresaliente de estos bobinados es que el número de ramas en paralelo es igual al número de polos. Expresando lo dicho mediante una condición matemática, y llamando:

p = Número de polos
a = Número de ramas en paralelo del bobinado se tiene:

$$a = p$$

De lo que antecede, resulta que el número de escobillas debe ser igual al número de polos, puesto que cada rama del devanado necesita dos escobillas, una para la entrada y otra para la salida de corriente.

Así, por ejemplo, una máquina bipolar tendrá dos ramas en paralelo y dos escobillas; una máquina tetrapolar tendrá cuatro escobillas y cuatro ramas en paralelo en el bobinado, etcétera.

Para calcular los pasos, a fin de efectuar el trazado del bobinado, se deben considerar algunas cantidades características, que son invariables para cada máquina; haremos uso para ello, de la terminología más común, que es:

N = Número de ranuras del inducido o rotor.
Z = Número de lados de bobina que forman un haz de conductores activos, con lo que el número de bobinas será igual a la mitad del número de lados de las mismas.
K = Número de delgas del colector o conmutador.
y_1 = Primer paso elemental, en avance, contado como cantidad de lados de bobina.

$y_2 =$ Segundo paso elemental, en retroceso, contado como cantidad de lados de bobina.

$y =$ Paso resultante, contado como lados de bobina entre el comienzo y fin de un bucle del devanado.

Para devanados imbricados, hemos visto que:

$$y = y_1 - y_2$$

$y_n =$ Paso de ranuras, es decir, cantidad de ranuras de inducido entre un lado de bobina y el otro que se considere.

$y_k =$ Paso de colector, o cantidad de delgas entre una conexión con el inducido y la próxima, eléctricamente, o de conexión subsiguiente.

p y $a =$ Número de polos y de ramas en paralelo, respectivamente, tal como ya se dijo más arriba, y que son iguales entre sí para bobinados imbricados.

Habrá que considerar además, si el número de ranuras del rotor es divisible o no por el número de polos de la máquina, pues se producirán algunas diferencias en el trazado, en caso que no lo fuera.

Para encontrar el sentido de corriente en los conductores activos, se aplicará en cada caso la regla de la mano derecha, en los generadores, y para hallar el sentido de giro, la regla de la mano izquierda, en los motores. Ambas han sido descriptas anteriormente.

Convencionalmente, supondremos en los diagramas desarrollados que las masas polares están encima del dibujo, a fin de fijar el sentido de las líneas de fuerza, que serán entrantes al papel para los polos Norte, y saliente para los Sud. Los sentidos de corriente indicados corresponden a generadores, y si se trata de motores, se considerarán contrarios a los dibujados, pues si un generador debe trabajar como motor y se desea conservar el sentido de la circulación de corriente en el inducido, girará en sentido contrario, o, conservando el sentido de giro, se deberá invertir las flechas en el dibujo. Entendemos con esto, que igual polaridad en extremos de conductores corresponde a igual sentido de circulación de corriente en los conductores del rotor, puesto que si nos referimos a los bornes de la red, el cambio de signo es automático, puesto que la corriente sale del borne positivo del generador para ir al positivo de la red, mientras que en los motores, la corriente sale del borne positivo de la red para entrar por la escobilla positiva del motor, con lo que, sin invertir ninguna conexión, el pase de generador a motor, se realiza sin inconveniente.

Citamos esto, porque en el trazado del devanado hay una inversión de sentidos, que en el funcionamiento de la máquina se produce automáticamente, pero que se debe tener en cuenta al diseñar el bobinado.

Cálculo del bobinado. Pasos elementales

Los pasos descriptos anteriormente, pueden ser calculados en función de cantidades conocidas para cualquier máquina, si se trata de realizar un devanado imbricado o paralelo:

El paso elemental vale:

$$y_1 = \frac{Z \pm b}{p}$$

Este es paso en avance, y en la expresión, Z es el número de lados de bobina, doble del número de bobinas. En devanados de doble capa, que son más comunes, el número de bobinas es igual al número de ranuras del rotor, de modo que Z será:

$$Z = N \times 2$$

es decir, igual al doble del número de ranuras del inducido.

Siguiendo con la fórmula anterior, p es el número de polos, y b, un número cualquiera, que se sumará o restará, hasta obtener que el paso elemental resulte un número impar. Se elegirá el número b lo menor posible.

Así por ejemplo, si el número de ranuras es 48, con lo que el número de lados de bobinas, Z, será 96, y la máquina tetrapolar ($p = 4$), se debe elegir $b = 4$, porque el numerador debe ser divisible por el denominador para dar un número entero, y además, impar.

Se tiene:

$$y_1 = \frac{96 \pm 4}{4} = \frac{100}{4} = 25$$

que es impar y entero como se quería, viéndose que se ha necesitado sumar el número 4.

También se hubiera podido restar el número 4, puesto que:

$$y_1 = \frac{96 - 4}{4} = \frac{92}{4} = 23$$

también número entero e impar. Si se hubiera sumado 2, no se hubiera obtenido un número entero como resultado, de modo que el número mínimo a sumar (o a restar) es 4.

El paso elemental de retroceso se calcula teniendo como base que la resta de los dos pasos elementales debe dar el paso resultante, es decir que:

$$y = y_1 - y_2 = 2$$

es decir, que entre el paso de avance y el de retroceso debe haber una diferencia de dos lados de bobina, luego el paso de retroceso debe ser igual al de avance, descontándose 2, es decir:

$$y_2 = y_1 - 2$$

En el ejemplo anterior, en que se tenía un paso elemental de 25, el paso de retroceso será:

$$y_2 = 25 - 2 = 23$$

La práctica aconseja la utilización del paso corto para economizar conductores, de modo que generalmente se adoptará la solución consistente en restar el número b en lugar de sumarlo, en la fórmula general que da el primer paso en avance.

Pasos de ranura

La tendencia moderna es utilizar los pasos de ranura para el trazado del bobinado. La razón está en la mayor comodidad de su empleo, pues es más fácil contar las ranuras que los lados de bobina. Para calcular los pasos de ranura debe tenerse en cuenta que ellos serán lo más próximo posible al paso polar, para que la f.e.m. inducida en el bobinado sea máxima. Recordemos que el paso polar era:

$$\text{Paso polar} = \frac{N}{p}$$

De modo que el paso de ranura se calculará restando (o sumando) a N una cantidad pequeña como para que el resultado dé un número entero, preferiblemente impar aunque no es indispensable. La fórmula para calcular el primer paso de ranura en avance es:

$$y_n = \frac{N - b}{p}$$

siendo N el número de ranuras del rotor y p el número de polos. La cantidad b será la menor posible para que y_n resulte un número entero.

El paso de ranura en retroceso se calcula sabiendo que el resultante en devanados imbricados debe valer 1, puesto que el fin de una bobina debe unirse al comienzo de la siguiente que está en la ranura contigua al primer lado considerado. Luego, el paso de retroceso vale:

$$y_n = y_n - 1$$

Para el inducido de 48 ranuras y 4 polos que se propuso como ejemplo resultan los siguientes pasos de ranura:

$$y_n = \frac{48 - 0}{4} = 12$$

$$y_n = 12 - 1 = 11$$

Notándose que no ha sido necesario restarle nada a N para que el paso resulte un número entero. Esto sucede siempre que el número de ranuras es divisible por el de polos.

Paso de colector

Es, como se dijo, el número de delgas que media entre la conexión de una bobina y la conexión de la próxima que le sigue eléctricamente en el devanado. Para bobinados imbricados o paralelos, el paso de colector vale:

$$y_k = \pm 1$$

significando el doble signo que la conexión de la bobina siguiente puede quedar hacia adelante, en el sentido que sigue el bobinado, o hacia atrás. En el primer caso, el bobinado es de tipo común, y en el segundo, de tipo cruzado.

Posición de escobillas

Las escobillas, en las máquinas con devanado imbricado, se colocan en número igual al de polos, y en posición que coincide aproximadamente con el eje mismo de las masas polares. En una máquina bipolar, se colocarán dos escobillas diametralmente opuestas; en una tetrapolar, cuatro escobillas formando ángulos de 90° entre sí, y así siguiendo.

Los sentidos de corriente en los conductores del inducido deben ser tales, con respecto a la posición que se fije para las escobillas, que los lados de bobina que concurran a la delga del colector en que se apoya en ese instante la escobilla, tengan sentidos convergentes de corriente, o divergentes, según la polaridad de que se trate.

Así, para la escobilla positiva, en los generadores, se tendrá que las corrientes en los dos lados de bobina que concurren a la delga en que se apoya aquella, deben ser convergentes, a efectos que no se produzca anulación de la corriente inducida.

Esto es tan importante, que conviene verificar siempre si la posición fijada para las escobillas es correcta, para lo que se marcarán los sentidos de corriente en todos los conductores, y se comprobará si convergen los mismos sobre la escobilla positiva y divergen desde la negativa.

En los ejemplos prácticos de devanados que seguirán, se marcará siempre la posición de escobillas y la de las masas polares, para servir de modelo y poder establecer comparaciones con otros proyectos de devanados, pues aunque difieran las cantidades de bobinas del bobinado, la posición relativa entre ambas cosas se mantiene, así como la polaridad exterior de la máquina. Recordemos aquí lo dicho más arriba, referente a que en los ejemplos se considerarán los sentidos de corriente como si se tratara de generadores.

EJEMPLO DE BOBINADO IMBRICADO PARA MÁQUINA DE DOS POLOS

Se tratará un ejemplo numérico de devanado paralelo, de dos capas, para un motor o generador bipolar. Los datos son fijados arbitrariamente, pero

puede extenderse el caso a otro ejemplo de distinta cantidad de bobinas, pues se aplicarán las fórmulas generales.

Los datos son:

Número de polos, p, y de ramas en paralelo del devanado, a	2
Número de ranuras del inducido o rotor (N)	16
Número de delgas del colector o conmutador (K)	16
Número de lados de bobina por ranura, por ser un devanado común, tipo doble capa	2
Número de bobinas a ejecutar, igual al número de ranuras del inducido, por la misma razón anterior	16
Número de escobillas, por ser bobinado imbricado bipolar	2

Con estos datos y las características señaladas, derivadas de los primeros, una vez fijado el tipo de devanado a ejecutar se pueden calcular todas las demás cantidades que interesan.

Número de lados de bobinas.

También llamado número de haces inducidos, por formar cada lado de bobina un paquete con los conductores activos a colocar en las ranuras del rotor. Su número es siempre doble del número de bobinas. Como este último, en bobinas de doble capa, es igual al número de ranuras del rotor, se tiene:

$$Z = 2 \times 16 = 32$$

Paso elemental de avance.

Conocido el número de lados de bobina, se calcula este paso, que está dado por la expresión

$$y_1 = \frac{Z \pm b}{p}$$

y como el número de lados de bobinas Z es igual a 32, y el número de polos p es igual a 2, se tomará para b el mínimo número que permita dividir a la suma por 2, y que dé un resultado impar. Tal número es 2, pues:

$$y_1 = \frac{32 + 2}{2} = 17$$

que es el paso elemental de avance adoptado, y que resulta un número entero e impar como se postuló.

Paso resultante.

Se puede calcular previamente al paso elemental de retroceso, y vale:

$$y = y_1 - y_2 = 2$$

permitiendo determinar inmediatamente el otro paso elemental.

Paso elemental de retroceso.

Se deduce en función del paso elemental de avance y del paso resultante. Su valor es:

$$y_2 = 17 - 2 = 15$$

con lo que quedan fijados los pasos del bobinado, contados como cantidades de lados de bobina.

Pasos de ranura.

Sabemos ya que los pasos elementales del bobinado permiten hacer el trazado, pero actualmente se prefiere utilizar los pasos de ranura por ser de más rápida y fácil aplicación. Calculemos estos pasos en la forma que se vió anteriormente.

Paso de ranura en avance:

$$y_n = \frac{N - b}{p} = \frac{16 - 0}{2} = 8$$

Paso de ranura en retroceso:

$$y'_n = y_n - 1 = 8 - 1 = 7$$

Paso resultante de ranura:

$$y_n - y'_n = 8 - 7 = 1$$

Con los cuales se hará el trazado del bobinado en la forma que se verá en seguida. Para estos ejemplos mostraremos cómo se determina el trazado usando los dos tipos de pasos, de bobinado y de ranura, a fin de que se pueda apreciar cuál resulta más cómodo. Además, un trazado permite ser verificado si se conocen los dos juegos de pasos.

Paso de colector.

Ya se ha dicho que para bobinados imbricados sencillos, valía:

$$y_k = \pm 1$$

Se adoptará en este ejemplo el valor positivo, es decir 1, para simplificar la representación.

Trazado del devanado.

Con los resultados obtenidos se puede dibujar el esquema de bobinado que es la solución del problema propuesto, y que aparece en la figura 179.

En primer lugar, se dibujan las 16 ranuras del inducido, supuesto desarrollado sobre el plano. Se desarrolla asimismo el colector, que también tiene 16 delgas. Para el trazado del devanado no hace falta todavía la ubicación de los polos, puesto que se puede suponer que el rotor está detenido en cualquier posición.

Se dibujan dos conductores por ranura, que representan cada uno el haz de conductores activos que forma un lado de bobina, representando con línea llena el que se supone colocado en la parte superior, es decir, más lejos del eje del rotor, y con línea punteada, el que está colocado debajo del anterior.

Se numeran los lados de bobina del 1 al 32, pues ésta es la cantidad que hay en total. Acto seguido pueden marcarse los pasos elementales, para lo que, partiendo del conductor 1, se cuentan 17 conductores más, teniendo en cuenta todos los que se encuentran, es decir, los superiores y los inferiores. Se llegará lógicamente, al conductor Nº 18 en el paso elemental de avance, y al conductor Nº 3 en el de retroceso, pues el paso de retroceso vale 15.

Se unen ahora en la forma indicada en la figura, el conductor Nº 1 con

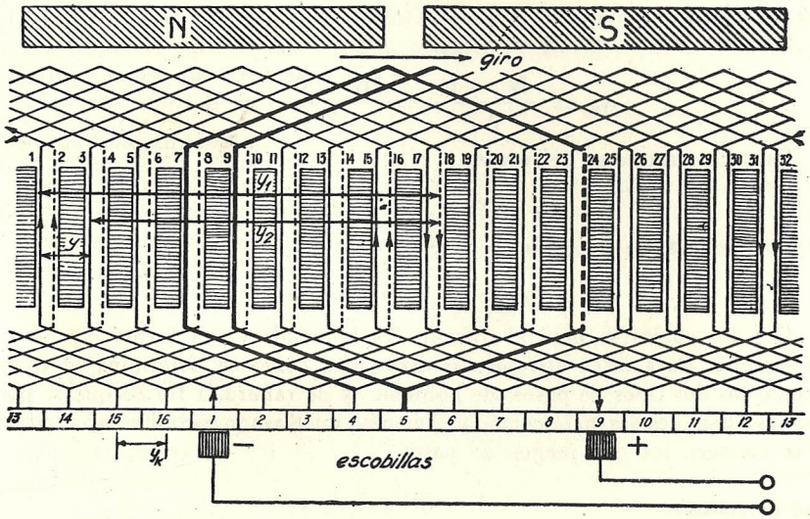

Fig. 179. — Bobinado imbricado o paralelo para una máquina bipolar.

el Nº 18, por la parte de arriba del rotor, que se supone es la posterior, y por la parte de abajo o delantera, el Nº 18 con el Nº 3, formando así la primer espira del devanado.

Donde se encuentran las dos líneas que van a los conductores 3 y 18 por la parte inferior, se unen con el colector, numerando a esa delga con el Nº 2, pues la delga anterior resultará unida al conductor Nº 1, en cuanto se termine de trazar el bobinado.

Siguiendo en esta forma, se unirá el conductor 3 con el 20 por arriba; y el 20 con el 5 por abajo, conectando al mismo tiempo la delga Nº 3. Y así sucesivamente, cumpliendo pasos elementales de avance de 17 y de retroceso de 15, se terminará de trazar todo el devanado.

El paso de colector resultó igual a 1, puesto que una espira estaba conectada a la delga 2, por ejemplo, y la siguiente, a la delga 3.

Pasos de ranura.

Para ubicar rápidamente estos pasos conviene numerar las ranuras y no los lados de bobina como hemos hecho en la figura 179. En la práctica moderna de los devanados ese es el procedimiento adoptado, es decir, que en nuestro caso se colocarían los 16 números del 1 al 16 y no los 31 números que están en la figura. Pero como queremos mostrar como se trabaja con los pasos de bobinados, hemos numerado los lados de bobina.

Los pasos de ranura se interpretan así: el conductor Nº 1 está colocado en la primera ranura, y como el paso de ranura en avance es igual a 8, el conductor unido al Nº 1 debe estar 8 ranuras más adelante, es decir, en la novena, que es precisamente la que contiene a los conductores Nº 17 y 18, este último unido al Nº 1. El paso de ranura de retroceso es igual a 7, con lo que el conductor Nº 18, que está en la novena ranura, debe unirse a uno que esté en la segunda, para cumplir dicho paso. Efectivamente, el conductor 18 está unido al Nº 3, que está en la segunda ranura.

En la figura 179 se ha dibujado más gruesa una espira completa y parte de la siguiente, a fin de resaltar el recorrido del bobinado y hacer notar los pasos elementales.

Ubicación de escobillas.

Falta ahora encontrar los sentidos de corrientes inducidas para ubicar las escobillas y determinar la polaridad de las mismas.

Se comienza por fijar un sentido de rotación del inducido, al solo efecto de determinar el sentido de las corrientes. Se fija a continuación, una posición para las dos masas polares, para lo cual se reparte el largo total del rotor desarrollado en dos partes iguales, dejando un espacio en blanco, y el resto lo cubrirán los polos, que aparecen en la parte superior del dibujo, con el signo magnético que se indica (N. y S.).

Suponiendo que los polos están colocados encima del dibujo, y que se trata de un generador, la regla de la mano derecha dice que ésta debe colocarse extendida de abajo hacia arriba, con la palma vuelta hacia arriba del plano, es decir, el dorso contra el papel, para recibir las líneas de fuerza provenientes del polo Norte. El pulgar debe señalar hacia la derecha, pues ese es el sentido de desplazamiento de los conductores.

Los dedos extendidos señalan hacia arriba, de manera que en los conductores 1, 2, etc., hasta el 16, las corrientes serán ascendentes en el dibujo, y desde el 17 hasta el 32, serán descendentes, por estar bajo el polo contrario, es decir, el Sur.

Resulta evidente que la escobilla positiva estará en este momento tocando la delga Nº 9, porque hacia ella convergen las corrientes de los conductores 17 y 32, y que la negativa estará bajo la delga Nº 1, porque de ella divergen las corrientes de los conductores 1 y 16.

Se tiene pues, trazado el bobinado, conectado el colector, fijada la posición de escobillas con respecto a las masas polares, que como se ve resultan

en el centro de las mismas, y disponibles los bornes exteriores del rotor. No corresponde a esta parte la conexión de los inductores, por pertenecer a otro capítulo, ya tratado. Sólo resta el cálculo de la sección de los conductores del bobinado, que se verá más adelante, pues el método es general para todos los devanados.

EJEMPLO DE BOBINADO IMBRICADO PARA MÁQUINA DE CUATRO POLOS

Puede resultar de interés para el lector el ejemplo numérico de un devanado imbricado o paralelo para una máquina de cuatro polos, aunque más no sea que para notar la economía de cobre en las conexiones frontales, que resultan ahora de mucho menor longitud. Aumentando el número de polos, se obtiene aun mayor economía.

Se tratará también en este caso de un arrollamiento en doble capa, por ser el más usual, e igualmente que en el caso anterior, el número de ranuras del inducido será divisible por el número de polos, porque el ejemplo correspondiente al caso de no cumplirse tal condición, será tratado aparte. El número de ranuras será de 16, divisible por 4, que es el número de polos.

Los datos, fijados al azar, para generalizar aun más el modelo propuesto, son:

Número de polos y de ramas en paralelo del bobinado (corresponden a p y a, respectivamente)	4
Número de ranuras del inducido o rotor (N)	16
Número de bobinas, igual a N	16
Número de delgas del colector (K)	16
Número de lados de bobina por ranura del inducido, por ser devanado sencillo, tipo doble capa	2
Número de escobillas, por ser bobinado imbricado tetrapolar	4

Con estos datos se pueden determinar los pasos para el trazado del devanado. Procederemos por partes, como en el ejemplo anterior, para seguir ordenadamente el proceso de cálculo.

Número de lados de bobina.

Es decir, también el número de paquetes de conductores activos que se alojan en las ranuras del inducido, estando un lado de la bobina arriba y el otro lado de la misma debajo del otro haz de conductores, en distinta ranura, como ya se ha visto. El valor que hemos llamado Z, será en este caso:

$$Z = 2 \times 16 = 32$$

es decir doble del número de bobinas, como es lógico, puesto que cada una de ellas tiene dos lados.

Paso elemental de avance.

En función del número de lados de bobina, al que se debe sumar una cantidad arbitraria b, pequeña, que haga al resultado entero e impar, se calcula y_1:

$$y_1 = \frac{Z \pm b}{p}$$

Notando que, en este caso, como p vale 4, para que Z sea divisible por 4 hay que sumarle por lo menos un número 4 para que se haga igual a 36.

$$y_1 = \frac{32 + 4}{4} = 9$$

que resulta un número entero e impar, como se deseaba, y que por lo tanto, adoptamos como paso elemental de avance. Se hace notar que el mismo resultado se hubiera obtenido restando 4 al numerador, pero el paso de avance hubiera sido 7 en lugar de 9, pudiéndose ejecutar el bobinado con cualquiera de los dos pasos. Hemos adoptado en el ejemplo el paso de 9, sin razón de peso que así lo indique.

Paso resultante.

Como en todos los devanados imbricados sencillos, tiene por valor:

$$y = y_1 - y_2 = 2$$

que permite inmediatamente calcular el otro paso elemental.

Paso elemental de retroceso.

Está dado en función del paso de avance y del resultante, ya conocidos a esta altura de los cálculos. Su valor será:

$$y_2 = 9 - 2 = 7$$

Teniendo así fijados los tres pasos necesarios para trazar el bobinado, los que se cuentan como números de haces conductores sobre el desarrollo del rotor.

Pasos de ranura.

Ya sabemos calcular los pasos de ranura, que en este ejemplo tomarán los siguientes valores, de acuerdo con los datos conocidos.

Paso de ranura en avance:

$$y_n = \frac{N - b}{p} = \frac{16 - 0}{4} = 4$$

Paso de ranura en retroceso:

$$y'_n = y_n - 1 = 4 - 1 = 3$$

Paso resultante de ranura:

$$y_n - y'_n = 4 - 3 = 1$$

Con estos pasos se puede encarar el trazado del bobinado, lo mismo que con los pasos elementales de bobina. Hemos dicho ya anteriormennte que la tendencia moderna es emplear los pasos de ranura, pues permiten simplificar las operaciones.

Paso de colector.

Al igual que en todos los devanados imbricados simples, este paso es siempre igual a uno, en avance o en retroceso, según convenga. Para este ejemplo hemos adoptado el valor 1 en avance, para simplificar la figura.

Trazado del devanado.

Ya se está en condiciones de dibujar el recorrido del arrollamiento en el rotor, que es el objeto del problema, y que aparece en la figura 180.

El inducido tenía 16 ranuras, las que serán dibujadas esquemáticamente, suponiéndolo desarrollado sobre un plano. Más abajo se representan las

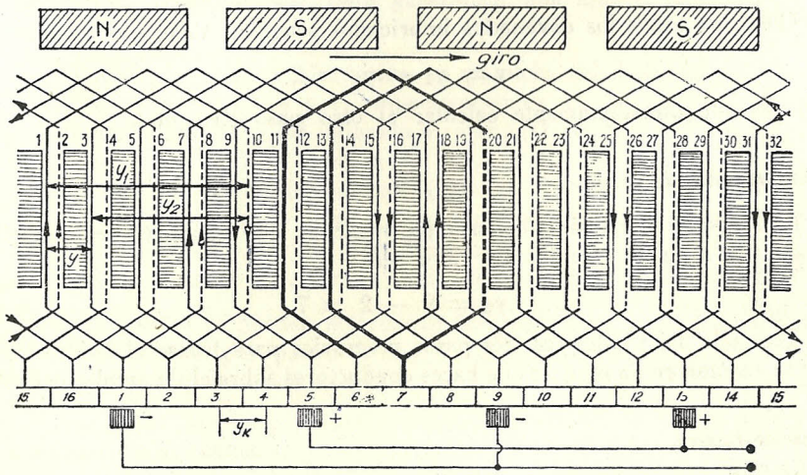

FIG. 180. — Bobinado imbricado o paralelo para una máquina de cuatro polos.

16 delgas del colector, y en la parte superior se pueden dibujar las masas polares; para esto último, se divide el largo total del inducido desarrollado, en cuatro partes iguales, pues se trata de una máquina de cuatro polos, y se dejan a ambos lados de las líneas divisorias, espacios en blanco, siendo lo restante, los cuatro polos, dos Norte y dos Sur, alternados en la ubicación.

En cada ranura van dos conductores (en realidad son dos haces conductores, pero para el dibujo dijimos que se tomaba una sola línea, representativa de todo el paquete), uno superior, que se traza con línea llena, y otro inferior, que se dibuja punteado.

Se procede de inmediato a numerar todos los conductores o lados de bobina, que son 32, en este ejemplo. Los números impares corresponderán a los conductores superiores y los pares a los que están colocados debajo de ellos, es decir, en la parte del fondo de la ranura del rotor. El conductor Nº 1 debe estar unido a otro que diste de él el paso elemental de avance, que vale 9, por lo que contando a partir de 1 nueve conductores más se llega al Nº 10, uniendo ambos con una línea quebrada por la parte de arriba. Desde el conductor Nº 10 se debe volver para atrás una cantidad igual al paso elemental de retroceso, es decir 7 conductores, con lo que se llegará al conductor Nº 3.

La distancia entre los conductores inicial y final de la espira debe ser igual al paso resultante, que era igual a 2, lo que se cumple efectivamente.

En la mitad del paso de retroceso se conecta la delga Nº 2 del colector, reservando la Nº 1 para el final del devanado, puesto que deberá estar conectada al conductor Nº 1. De aquí en adelante, se sigue en la misma forma, es decir, uniendo por la parte superior, el conductor Nº 3 con el Nº 12 (paso de avance 9) y por la parte de abajo el 12 con el 5 (paso de retroceso 7); el 5 con el 14 y el 14 con el 7, y así sucesivamente, conectando siempre la delga del colector en la mitad del conductor frontal de retroceso. En esta forma se tendrá trazado todo el devanado.

Se observará en la figura que el paso de colector ha resultado igual a 1, pues dos espiras sucesivas quedan unidas a láminas contiguas del mismo, como debe ser.

Pasos de ranura.

Veamos si se cumplen los pasos de ranuras. El conductor 1 está unido al conductor 10, y entre ellos debe mediar el paso de ranura en avance, que es 4, es decir, que entre el conductor 1 y el 10 debe avanzarse 4 ranuras, o, lo que es lo mismo, ya que el conductor 1 está colocado en la primera ranura, el 10 deberá estar en la quinta, cosa que se cumple. Al retroceder, se deberá pasar de la ranura quinta a la segunda, puesto que el paso de ranura en retroceso es igual a 3. Como el conductor 10 está unido al 3, que está en la segunda ranura, también se cumple. El paso resultante de ranura es igual a uno, luego los conductores que son comienzos de espiras contiguas, deben estar ubicados en ranuras también contiguas. Para nuestro ejemplo, ellos son el 1 y el 3, que están, efectivamente, en dos ranuras adyacentes.

La figura 180 aclara todo lo dicho, y en ella, a fin de facilitar al lector la interpretación, se ha dibujado una de las espiras más gruesas.

Ubicación de escobillas.

Para colocar las escobillas en la posición relativa que les corresponde respecto de las masas polares, hay que encontrar el sentido de las corrientes

inducidas en los distintos conductores del rotor. Aplicaremos la mano derecha, si se trata de un generador y la mano izquierda, en el caso de un motor.

Al proponer el ejemplo numérico, se dijo que lo referiríamos a un generador, de modo que se aplicará la primera de las dos reglas mencionadas. No hay ninguna dificultad en resolver el problema en el caso del motor eléctrico, pues basta tomar sentido contrario para las corrientes, o, lo que es lo mismo, suponer que la escobilla indicada con signo positivo tiene convergencia de corrientes, cosa inexacta para los motores, pero que simplifica la tarea del proyectista en la aplicación de reglas para el sentido de las corrientes. Por otra parte, ya se dijo que las escobillas conservaban la polaridad al pasar de motor a generador o viceversa, de modo que la proposición anterior no es equivocada.

Fijado el sentido de rotación del inducido, que aparece en la figura, apliquemos la regla de la mano derecha para el polo Norte, que aparece a la izquierda de la misma. La palma debe estar vuelta hacia arriba, y el pulgar señalando hacia la derecha, con lo que los dedos restantes indicarán que el sentido de la corriente inducida es ascendente.

Aplicando ahora la regla para la zona correspondiente al polo Sur, se verá que las corrientes tienen sentido contrario al anterior, es decir, son descendentes. Para los otros dos polos, por analogía, corresponderá sentido ascendente para el Norte y descendente para el Sur.

Se nota, inmediatamente que de la delga Nº 1, los dos conductores que están conectados a ella tienen corrientes ascendentes, por lo que debajo de ella estará la escobilla de entrada de corriente a la máquina en los generadores, o de salida en los motores, esto es, la escobilla negativa. Lo mismo se encontrará para la delga Nº 9, por lo que debajo de ésta habrá otra escobilla negativa, que se debe conectar en paralelo con la que está en este momento debajo de la delga Nº 1.

Las escobillas positivas, que también deben ser dos, estarán debajo de las delgas a las que convergen corrientes descendentes, que son las Nº 5 y 13. Se podría encontrarlas sin observar las flechas, porque deben estar en posición simétrica respecto de las dos negativas, es decir que, habiendo cuatro escobillas, por ser la máquina de cuatro polos con devanado imbricados, ellas están a 90° entre sí, es decir, a cuatro delgas de distancia por haber un total de 16 delgas en este colector, y en general, a la cuarta parte de delgas de distancia.

Además, las escobillas deben quedar debajo de los centros de las masas polares, de modo que se tiene otra manera de ubicarlas cuando se conoce la polaridad de una de ellas, lo que permite fijar las de las otras.

Observando el devanado terminado, se nota la diferencia de longitud de las conexiones frontales, comparado con la máquina bipolar de la figura 179, lo que representa una mejor realización del bobinado aunque haya que colocar doble número de polos, repartiendo más los devanados inductores. La mejora obtenida en el inducido compensa el aumento de costo del inductor, por cuya razón, en la práctica, las máquinas grandes, que deben tener gran rendimiento referido al costo de fabricación, tienen más de dos polos, y aun, más de cuatro.

Faltaría, para terminar con el problema, el cálculo de la sección de los conductores que forman las bobinas del inducido, pero como ello es general para todos los devanados, se tratará más adelante. Lo mismo podemos decir de lo que se refiere a las distintas tensiones de utilización de las máquinas, así como el rebobinaje para cambio de tensiones de trabajo, cosa frecuente en la práctica.

DEVANADOS CON EL NÚMERO DE DELGAS INDIVISIBLE POR EL NÚMERO DE POLOS

Hay casos en que la cantidad de delgas o de ranuras no es divisible por el número de polos que tiene la máquina. En tales devanados, los pasos se eligen más cortos que la distancia polar o, a lo sumo, pueden resultar iguales a ella.

Un resultado interesante es la asimetría de las escobillas, pues mientras en los bobinados comunes de cuatro polos, las escobillas estando a 90° entre sí, apoyan al mismo tiempo en delgas equidistantes sobre el colector, en el tipo de máquinas que estamos tratando no sucederá eso, porque el número de delgas no es divisible por 4 (en general, por p, número de polos).

La simetría sólo se cumple para escobillas alternadas en su ubicación, es decir, para escobillas de igual polaridad.

Con este tipo de devanados se obtiene una mejora en la conmutación, porque el corte de corriente se hace a destiempo en un extremo de la bobina con respecto al otro, lo que favorece la disminución del fenómeno de autoinducción.

Daremos un ejemplo numérico de esta clase de devanados, para mejor ilustración de lo dicho más arriba, eligiendo arbitrariamente los datos.

Para que se presente el caso de que el número de delgas no sea divisible por el de polos, la máquina tendrá, por lo menos, cuatro polos, y supondremos que ese número de delgas es 14, no divisible por 4. Los demás datos son:

Número de polos y de escobillas (p y a respectivamente) ..	4
Número de ranuras del inducido o rotor (N)	14
Número de bobinas, igual a N	14
Número de delgas del colector (K)	14
Número de lados de bobina por ranura del rotor, por ser devanado sencillo, doble capa	2
Número de escobillas, por ser devanado imbricado tetrapolar	4

Con lo que se pasa a calcular los pasos y demás cantidades necesarias para el trazado del devanado.

Número de lados de bobina.

La cantidad de haces de conductores que forman los paquetes activos. es el doble del número de bobinas:

$$Z = 2 \times 14 = 28$$

Paso elemental de avance.

Se emplea la fórmula ya vista:

$$y_1 = \frac{Z - b}{p}$$

en la que hemos puesto el signo de resta únicamente en el numerador, porque los pasos de estos devanados, como se dijo, deben ser menores, o a lo sumo, iguales al paso polar. Con los datos de que se dispone, tenemos:

$$y_1 = \frac{28 - 0}{4} = 7$$

es decir, que no hubo necesidad de restar nada a la cantidad de haces activos para obtener un paso entero e impar.

Paso de retroceso.

Puesto que el paso resultante, al igual que en todos los devanados imbricados en doble capa, es:

$$y = y_1 - y_2 = 2$$

resulta conocido y permite calcular el paso de retroceso cuando se conoce el de avance. En el ejemplo propuesto es:

$$y_2 = y_1 - 2 = 7 - 2 = 5$$

es decir, es la diferencia entre el paso elemental de avance y el resultante que vale 2.

Pasos de ranura.

Calculemos los pasos de ranura para el trazado rápido del devanado, en la forma ya conocida. En este caso se verá que la cantidad b que hay que restar en el numerador no es cero, como en ejemplos anteriores, puesto que para que el número de ranuras, 14, sea divisible por el de polos, 4, hay que restarle 2 unidades:

Paso de ranura en avance:

$$y_n = \frac{N - b}{p} = \frac{14 - 2}{4} = 3$$

Paso de ranura en retroceso:

$$y'_n = y_n - 1 = 3 - 1 = 2$$

Paso resultante de ranura:

$$y_n - y'_n = 3 - 2 = 1$$

Con estos pasos ya se puede trazar el bobinado para lo cual nos remitimos a la figura 181 donde se pueden observar los dos tipos de pasos: el de bobinado y el de ranuras.

Trazado del bobinado.

El inducido tiene 14 ranuras, en cada una de las cuales van colocados dos lados de bobina, uno inferior, que se dibuja punteado, y otro superior, que dibujamos con línea llena. El colector se dibuja en la forma que se trató hasta aquí, y tiene 14 delgas.

Las masas polares son cuatro y abarcan cada una algo menos de la cuarta parte del largo total del rotor desarrollado, para dejar espacios en

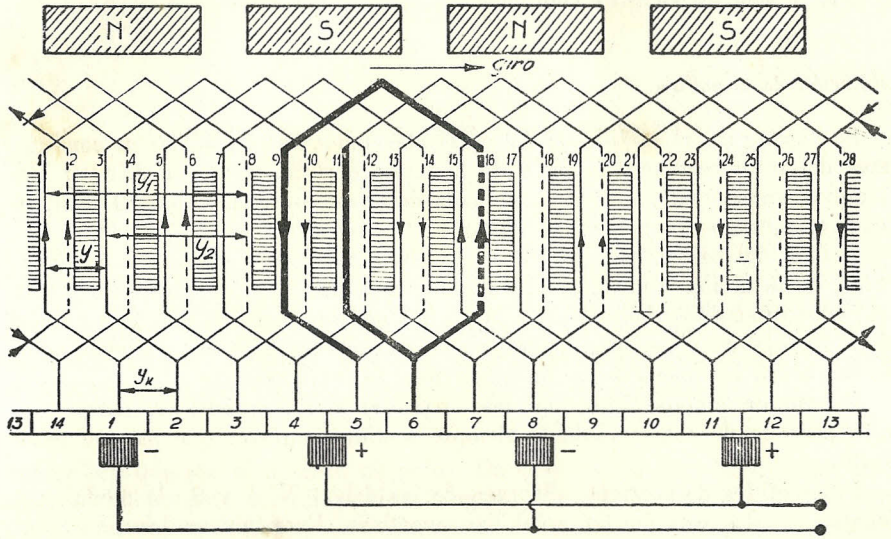

Fig. 181. — Bobinado imbricado para un caso en que el número de ranuras no es divisible por el de polos.

blanco, que corresponden a la realidad. Se marcan los polos alternativamente Norte y Sud, como se ve en la figura.

Numerando los conductores o lados de bobinas del 1 al 28, pues esa es la cantidad total, se puede comenzar a trazar el devanado.

El paso de avance es igual a 7, por lo que el conductor 1 debe quedar unido al conductor Nº 8 por la parte superior; el paso de retroceso era igual a 5, de modo que por la parte inferior se unirá el conductor 8, al que habíamos llegado, con el Nº 3. En el centro de la conexión frontal de retroceso, se conecta la delga Nº 2, dejando la Nº 1 para el conductor Nº 1.

Los dos conductores que son comienzos de espiras, deben distar entre sí una cantidad igual al paso resultante, que es dos, y que se cumple efectivamente, pues del Nº 1 al Nº 3 hay un paso igual a 2.

Se continúa en esta forma, uniendo por arriba el Nº 3 con el Nº 10 para cumplir paso de avance 7 y por debajo el 10 con el Nº 5; el 5 con

el 12 y el 12 con el 7, y así sucesivamente hasta llegar al conductor inicial que era el Nº 1, con lo que se habrá terminado el bobinado.

El paso de colector debe resultar igual a uno en los devanados imbricados, cosa que se cumple, como se ve en la figura. Veamos los pasos de ranura, que eran de 3 el de avance y de 2 el de retroceso. Si el conductor 1 está en la primera ranura, el que está conectado a él debe estar 3 ranuras más adelante, es decir en la cuarta, cosa cumplida en este devanado; el conductor 3 debe retroceder dos ranuras, es decir, estar en la segunda, también cumplido. Y entre el Nº 1 y el Nº 3 debe haber una ranura de distancia, es decir, estar en ranuras contiguas.

Ubicación de escobillas.

Se encontrará el sentido de las corrientes inducidas en los haces conductores del rotor mediante la regla de la mano derecha, como se dijo en los ejemplos anteriores, aclarando que consideramos un generador. El sentido de giro supuesto aparece en la figura.

Debajo del primer polo Norte de la izquierda, con la palma de la mano vuelta hacia arriba y el pulgar señalando en la dirección de giro, se ve que los dedos extendidos indican hacia la parte superior, es decir, que las corrientes inducidas en estos conductores serán ascendentes. Debajo del otro polo Norte pasará la misma cosa, de modo que pueden marcarse.

Debajo de ambos polos Sud las corrientes son descendentes, porque la regla práctica da como resultado siempre sentido contrario que para el polo Norte.

Los sentidos de corriente divergen de las delgas Nº 1 y 8, de modo que debajo de ellas estarán las escobillas negativas. Para ubicar las positivas, se puede atender a la posición relativa con respecto a las anteriores, resultando que deben estar exactamente entre las Nº 4 y 5 y entre las 11 y 12. Lo mismo resultará atendiendo a los sentidos de las corrientes.

Obsérvese que las escobillas positivas abarcan dos medias delgas, mientras que las negativas están exactamente sobre una delga. Un instante más tarde se invierten los papeles, y serán las negativas las que abarquen dos medias delgas. Lo interesante es notar la falta de simetría que hay entre ambos pares de escobillas, cosa que no resultaba así en los devanados para máquinas cuya cantidad de delgas era divisible por el número de polos.

En la misma forma se trazará el devanado para cualquier máquina cuyo número de delgas no sea divisible por el número de polos, notándose que el arrollamiento en sí no se diferencia mucho de los tipos comunes, ya que éstos se suelen hacer también con pasos cortos, es decir, que en cálculo del paso se resta una cantidad en vez de sumarla en el numerador de la fórmula que da el paso elemental de avance.

CAPÍTULO XIII

BOBINADO ONDULADO O SERIE

Los devanados que se construyen con pasos elementales siempre en avance, es decir, que adelantan siempre en su recorrido a lo largo del rotor, se denominan *ondulados* o tipo serie. Se utilizan en máquinas en que la tensión entre bornes es más o menos grande y la intensidad es más reducida, pues tienen, en general, menor número de ramas en paralelo que los imbricados. La característica sobresaliente de los devanados ondulados simples, es que el número de ramas en paralelo es siempre

$$a = 2$$

cualquiera que sea el número de polos. De esto resulta que harán falta sólo dos escobillas, para máquinas de cualquier número de polos. No obstante, se suelen colocar tantas escobillas como polos, para mejorar la conmutación.

La posición relativa de las escobillas mínimas necesarias, no siempre es diametral, como se verá más adelante, pues para máquinas de cuatro polos, se colocan dos escobillas a 90° entre sí. Para las bipolares, las dos escobillas serán diametrales.

Los bobinados ondulados no se pueden ejecutar para cualquier número de delgas del colector, o de ranuras del rotor, sino que se deben cumplir ciertas condiciones, sobre todo si las máquinas tienen más de dos polos. Este inconveniente no aparecía en los tipos imbricados.

Damos aquí las cantidades características que se emplearán en el cálculo de los arrollamientos tipo ondulado, definiendo cada una de ellas:

N = Número de ranuras del inducido o rotor.

Z = Número de lados de bobina, exactamente igual al doble de la cantidad de bobinas que haya, estando formada cada bobina por un cierto número de conductores, que no interesan para el trazado del bobinado.

K = Número de delgas o láminas del colector.

y_1 = Primer paso elemental en avance, contado como cantidad de lados de bobina.

y_2 = Segundo paso elemental en avance, contado como cantidad de lados de bobina.

y = Paso resultante, o distancia entre el primer lado de una espira y el último. Para bobinados ondulados el paso resultante es la suma de los dos pasos elementales, es decir:

$$y = y_1 + y_2$$

y_n = Paso de ranuras, o sea la cantidad de ranuras del rotor que median entre un lado de bobina y el otro que se considere.

y_k = Paso del colector, o cantidad de delgas que median entre la conexión de una bobina y la subsiguiente, eléctricamente. Puede ser mayor que el total de delgas del conmutador, puesto que los bobinados ondulados suelen dar varias vueltas en torno al inducido. Se contará este paso en un sentido determinado, que coincide con el avance del bobinado del rotor.

p = Número de polos que tiene la máquina, que debe ser siempre 2 ó múltiplo de 2.

a = Número de ramas en paralelo del bobinado que vale siempre 2 para el devanado ondulado sencillo.

En los devanados imbricados a y p eran iguales entre sí. Aquí no se cumple esto, pues hay siempre dos ramas en paralelo con cualquier cantidad de polos.

Para encontrar el sentido de corriente en los conductores se emplearán las mismas reglas prácticas descriptas para los devanados imbricados, en el capítulo anterior, es decir, las de la mano derecha para generadores y de la mano izquierda para motores, según el caso.

Referente a la posición relativa de las masas polares con respecto al desarrollo del inducido, emplearemos el mismo sistema que se describió en el capítulo anterior, es decir que aquéllas están colocadas fuera del dibujo, inmediatamente encima del plano desarrollado.

Condición del bobinado

Para que sea posible realizar un devanado ondulado, se debe cumplir que el paso de colector resulte un número entero, lo que se cumplía siempre para los tipos imbricados, pero, como veremos, no es realizable en todos los casos que se desee trazar uno ondulado.

La expresión matemática a verificar es:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\frac{1}{2} p} = \text{número entero}$$

es decir, que el número de delgas del colector, agregándole o restándole una unidad y dividido por la mitad del número de polos, debe dar un número entero por resultado.

Si la máquina tiene dos polos, la mitad de dos es uno, y la fórmula anterior siempre se cumple, pues todos los números son divisibles por la unidad. No pasa lo mismo para máquinas de mayor número de polos, pues para las de cuatro polos, por ejemplo, para cumplir la condición expuesta,

la cantidad de delgas del colector debe ser un número impar, para que al sumarle o restarle 1 resulte divisible por 2, que es la mitad del número de polos. Para máquinas de 6 polos, el numerador debe ser divisible por 3, lo que no siempre es fácil; y así sucesivamente. Además, hay otra condición a llenar, y es que la cantidad de delgas del colector y el paso de colector no deben ser divisibles entre sí, esto es, ser "primos entre sí".

En los ejemplos que se propongan, volveremos sobre esto para dejar bien aclarado que no siempre puede realizarse un devanado ondulado, en una máquina elegida al azar.

En el capítulo XIV veremos casos de bobinados ondulados que no cumplen la condición de posibilidad.

Cálculo del bobinado

Para trazar el devanado en el plano hace falta calcular previamente los pasos elementales, los que estarán dados por expresiones sencillas, en las que intervengan la cantidad de lados de bobina y el número de polos.

En los devanados ondulados, se comienza por calcular el paso resultante, que tendrá un valor:

$$y = \frac{Z \pm 2}{\frac{1}{2} p}$$

que debe resultar un número entero, y que es a su vez, la suma de los dos pasos elementales en avance:

$$y = y_1 + y_2$$

En la expresión anterior, Z es el número de lados de bobina, igual al doble de la cantidad de bobinas, es decir:

$$Z = 2 \times N$$

Los dos pasos elementales se reparten del total que representa el paso resultante, pero se los elegirá de manera que sean ambos impares, y en lo posible, de manera que los lados de bobinas puestas en cortocircuito por las escobillas se aparten de la línea neutra en la menor cantidad posible.

Pasos de ranura

Al igual que en los bobinados imbricados, hay una tendencia moderna a considerar los pasos de ranura en lugar de los de bobinado para efectuar el trazado. Para calcular estos pasos las expresiones difieren de las empleadas en el capítulo anterior, como es lógico.

El paso total o resultante de ranura es igual al paso de colector, y luego debe ser calculado con la misma expresión:

$$y_n = \frac{N \pm 1}{\frac{1}{2} p}$$

El resultado de esta fórmula debe dar un número entero para que se pueda trazar el bobinado. Los pasos de ranura en avance y en retroceso se eligen de modo que su suma dé el total y_n. Así, por ejemplo, si y_n vale 15 los pasos parciales pueden ser 8 y 7 o sino 7 y 8. Siempre debe tratarse que sean ambos lo más iguales posibles.

Resulta evidente la ventaja de trabajar con los pasos de ranura y no con los de bobinado, pues se ahorran cálculos, ya que el paso resultante de ranura es igual al paso de colector ya calculado. En efecto, el primer cálculo que hay que hacer es el paso de colector, que es a la vez la condición de posibilidad del trazado. En cambio, los pasos de bobinado, que se cuentan como lados de bobina, no tienen nada que ver con el paso del colector. Con los ejemplos que siguen, sin embargo, calcularemos los dos tipos de pasos, para mostrar la forma de operar con ellos. En la práctica basta seguir un solo criterio, y actualmente se suele emplear únicamente el cálculo de bobinados basados en los pasos de ranura, por su mayor simplicidad.

Paso del colector

Este paso era siempre igual a uno en los bobinados imbricados, pero en los ondulados tiene por expresión:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\frac{1}{2}\ p}$$

que debe resultar un número entero y que es a su vez, la expresión de la condición para poder realizar el devanado, la que se propuso en el párrafo anterior. Se ve que si la máquina es de dos polos, no habrá dificultades en trazar el devanado, pero si es tetrapolar K deberá ser impar, es decir, se deberá tener una cantidad impar de delgas en el colector, de lo contrario el devanado será irrealizable, salvo los casos del capítulo 14.

Ejemplos numéricos

Conviene verificar siempre si es posible trazar el bobinado antes de hacer el cálculo completo, para evitar pérdida de tiempo. La condición del paso del colector permitirá hacer tal verificación.

Supóngase tener una máquina de 32 ranuras y 32 delgas en el colector, con dos polos, en la que se desea construir un devanado ondulado. La condición es:

$$y_k = \frac{32 \pm 1}{1} = 33 \text{ ó } 31$$

ambos números enteros, por lo que el devanado será posible.

Los pasos de ranura no hace falta calcularlos pues ya se tienen. En efecto, si el paso de colector se elige 31 el paso de ranura resultante será:

$$y_n = 31$$

pues es igual al del colector. Separado en sus dos partes elementales, se elegirán 16 y 15 como pasos primero y segundo respectivamente.

Los pasos de bobinado son:

paso resultante: (Nº de lados de bobina $= 32 \times 2 = 64$)

$$y = \frac{64 \pm 2}{1} = 62$$

número entero, lo que está bien.

Los pasos elementales se elegirán de modo que su suma sea igual al paso resultante y que resulten ambos impares. Tomemos por ejemplo:

$$y_1 = 33 \qquad y_2 = 29$$

Verificando:

$$y = 33 + 29 = 62$$

vemos que dan el paso resultante.

El paso de colector se tomará de acuerdo con la expresión correspondiente, que es:

$$y_n = \frac{32 - 1}{1} = 31$$

habiendo restado el número 1 en el numerador, porque también se restó al calcular el paso de bobinado resultante.

Supongamos que la misma máquina anterior, tiene 4 polos y deseamos ejecutar un bobinado ondulado. La condición:

$$\frac{32 \pm 1}{2} = 16{,}5 \text{ ó } 15{,}5$$

dice que es imposible, pues tiene un resultado fraccionario.

Tomemos una máquina de cuatro polos con cantidad de delgas impar, por ejemplo 27, y con 27 ranuras en el inducido. La cantidad de lados de bobina será 54. La condición:

$$\frac{27 \pm 1}{2} = 13$$

da un número entero, lo que indica que el bobinado puede ejecutarse. Veremos si el paso de colector resulta indivisible por el número de delgas o viceversa.

El paso de colector es:

$$y_k = \frac{27 \pm 1}{2} = 13$$

y como ni 27 es divisible por 13, ni 13 por 27, el bobinado puede ejecutarse.

El paso resultante de ranura, ya sabemos que es igual al de colector, de modo que vale:

$$y_n = 13$$

que se repartirá en dos, lo más iguales posible:

$$7 + 6 = 13$$

Los pasos de bobinado son:

$$\text{paso resultante } y = \frac{54 - 2}{2} = 26$$

que pueden repartirse en pasos elementales 15 y 11 ó 13 y 13, pudiéndose elegir cualquiera de las dos soluciones. Supongamos la primera, de 15 y 11.

Posición de escobillas

Las escobillas, en las máquinas con devanados ondulados, se colocan en la línea de eje de masas polares, en número de dos, cualquiera que sea el número de polos, variando sólo el ángulo entre las mismas. Ya se dijo que, a veces, se colocan más de dos escobillas, no porque sean necesarias, sino para mejorar la conmutación.

Para determinar la ubicación y polaridad de las escobillas se marcan los sentidos de corriente en los conductores del inducido, colocando la positiva en el lugar en que convergen a una delga dos corrientes, y la negativa bajo la delga de la cual divergen dos corrientes.

Para encontrar los sentidos de las corrientes inducidas se aplica la regla de la mano derecha, en la forma ya explicada (véase cualquiera de los ejemplos numéricos que siguen), para generadores, y para motores, puede aplicarse la regla de la mano izquierda, o más comúnmente, la misma que para generadores, suponiendo que se trata de tal máquina, puesto que la polaridad obtenida en las escobillas coincide en motores y generadores.

Esto es lo que haremos en los ejemplos numéricos que sirven de modelos de bobinados ondulados, para distintos números de polos.

EJEMPLO DE BOBINADO ONDULADO PARA MÁQUINA DE DOS POLOS

Trataremos a continuación un caso práctico de devanado serie sencillo, de dos capas, que es el tipo más común y suponiendo que se trata de una máquina bipolar.

Los datos se han fijado de modo que el dibujo resulte claro, pero puede extenderse el caso a cualquier otra máquina de mayor número de delgas, siempre que se cumplan las reglas dadas.

Los datos son los siguientes:

Número de polos, p, de la máquina	2
Número de ramas en paralelo del bobinado igual que para todos los devanados ondulados (a)	2
Número de ranuras del inducido o rotor (N)	16
Número de delgas del colector o conmutador (K)	16
Número de lados de bobina por ranura, por tratarse de un bobinado en doble capa	2
Número de bobinas a ejecutar, igual al número de ranuras del inducido, por la misma razón	16
Número de escobillas, por ser devanado ondulado	2

datos con los cuales se puede encarar el proyecto del bobinado, para lo que se aplicará el sistema de cálculo ya tratado.

Número de haces inducidos.

La cantidad de paquetes de conductores activos es también el número de lados de bobina, o, lo que es idéntico, el doble de la cantidad de bobinas. Ya sabemos que en cada ranura del inducido se colocan dos lados de bobina, de manera que será igual su número al doble del número de ranuras:

$$Z = 2 \times 16 = 32$$

Condición de posibilidad.

Es la que dice que el paso del colector debe resultar un número entero y no divisible por el número de delgas o viceversa. Se tiene:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\frac{1}{2}\ p} = \frac{16 \pm 1}{1} = 17$$

que resulta un número entero y que no es divisible por el número de delgas 16, luego el bobinado es realizable. Con la cantidad hallada tenemos encontrado el *paso de colector*, y nótese que es mayor que el número de delgas que hay en todo el colector, es decir, que la conexión de una bobina, referida a la anterior se hace después de una vuelta completa del colector.

Si en vez de sumar la unidad en el denominador, se hubiera restado, se tendría que el paso de colector sería de 15, siendo también realizable el devanado. Con paso 17 en el colector, el bobinado se llama *cruzado* y con paso 15, *no cruzado*. En este ejemplo nos quedaremos con el tipo cruzado, para dejar el otro para un ejemplo que veremos más adelante.

Pasos de ranura.

De acuerdo a lo que sabemos, calculemos los pasos de ranura para el ejemplo propuesto. Tenemos 16 ranuras y 2 polos, de modo que aplicando la fórmula:

$$y_n = \frac{N \pm 1}{\frac{1}{2}\ p} = \frac{16 \pm 1}{1} = 17$$

Donde hemos elegido el signo de suma. Este paso resultante lo repartiremos en dos, de modo que su suma resulte 17. Esos dos pasos son 8 y 9:

$$8 + 9 = 17$$

Pasos de bobinado.

De acuerdo con lo visto al principio de este capítulo, el paso resultante se calcula en función del número de lados de bobina y de la mitad de polos que tenga la máquina. Resultó la expresión

$$y = \frac{Z \pm 2}{\frac{1}{2}\ p} = \frac{32 \pm 2}{1} = 34$$

en la que hemos sumado en el numerador el número 2, en vez de restarlo, para seguir con el criterio mencionado más arriba. El paso total resulta entonces casi igual a la cantidad total de lados de bobina, superándolo ligeramente, de modo que el principio y fin de una espira estará siempre bajo polos contrarios.

El paso resultante debe dividirse entre dos números que formen los dos pasos elementales de avance, que sean impares, y que su suma sea el paso resultante. Supongamos tomar, por simplicidad, iguales los dos, o sea 17 cada uno:

$$17 + 17 = 34$$

que da efectivamente el paso resultante. En la práctica, los dos pasos elementales deben diferir poco entre sí para que no se produzca mala conmutación, pero no es necesario que sean iguales. No habiendo inconveniente, nos quedaremos con los dos pasos elementales iguales.

Trazado de bobinado.

Tenemos todos los datos necesarios para efectuar el trazado del devanado, que aparece terminado en la figura 182.

Comenzamos por dibujar el desarrollo del inducido con sus 16 ranuras, y colocando en cada una de ellas dos lados de bobina, pertenecientes cada uno a bobinas distintas, por supuesto, y dibujando con línea llena el superior y con línea punteada el inferior.

Se traza el desarrollo del colector, que tiene en este caso 16 delgas. Se numeran los conductores del 1 al 32, dejando por ahora sin numerar las delgas del comutador.

Si se desea, pueden ubicarse las dos masas polares, abarcando cada una de ellas la mitad del desarrollo del rotor, dejando espacios en blanco entre ambas. Se ha designado a una de las mismas Norte y la otra Sud, arbitrariamente, pues la polaridad magnética depende del sentido del bobinado del campo inductor y se lo puede elegir de manera que coincida con lo indicado en la figura.

Se puede ahora marcar cada paso elemental, partiendo del conductor 1, por ejemplo. El primer paso es 17, por lo que el conductor Nº 1 deberá

unirse por la parte superior al conductor Nº 18, para que entre ambos medien 17 conductores. El segundo paso elemental es también de 17, de modo que el conductor Nº 18 debe unirse con otro que diste de él 17 conductores, más adelante, notándose que se termina el rotor sin haber cumplido el paso. Siguiendo contando después del último, que es el Nº 32, hasta tener el paso 17, se llegaría al conductor Nº 3. En la figura se han dibujado trozos de los cuatro primeros conductores del inducido, a continuación del fin del rotor, para facilitar el recuento.

Resulta entonces, que la suma de los dos pasos elementales es una cantidad mayor que el total de lados de bobina de que se dispone, es decir,

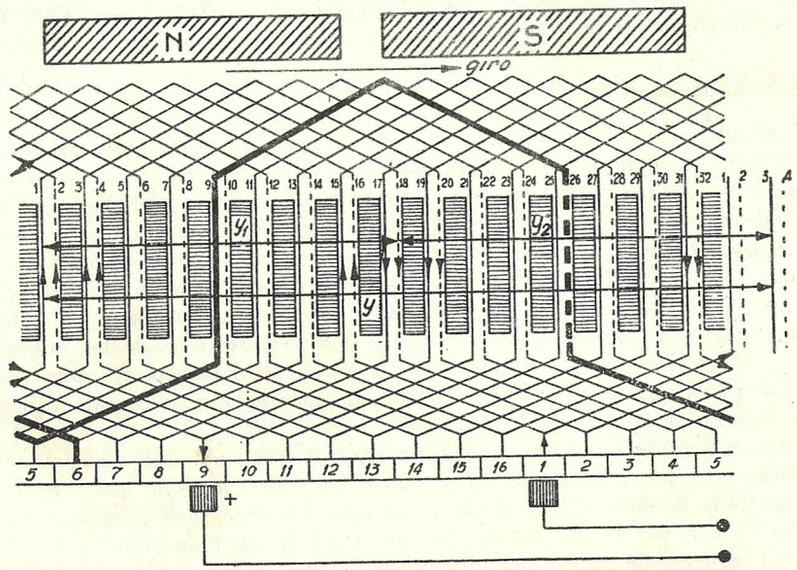

FIG. 182. — Bobinado serie u ondulado para una máquina bipolar.

se trata de un devanado cruzado, pues el fin de la espira está delante del comienzo, después de haber dado una vuelta completa al rotor.

En el paso elemental segundo, se conecta la delga del colector Nº 2, dejando la Nº 1 para el final del devanado.

Siguiendo en esta forma, se conecta por la parte superior el conductor Nº 3, al que hemos llegado, con el Nº 20, y éste, por debajo, con el Nº 5, conectando al pasar la delga Nº 3; el Nº 5 con el 22 y éste con el Nº 7 y así sucesivamente hasta terminar el devanado, llegándose al 31, el que estará unido por arriba al Nº 16 y éste, por debajo, a la delga Nº 1 y al conductor Nº 1, con lo que se ha terminado el bobinado.

El paso de colector ha resultado de 17, pues cada espira queda unida a una delga inmediata en el orden de avance, pero después de una vuelta

completa, de modo que el paso es igual a una delga más el número total que tiene el colector (16), dando por resultado 17.

Veamos si se cumplen los pasos de ranura. El conductor 1 está en la primera ranura, por lo que debe quedar unido a un conductor situado 8 ranuras más adelante, es decir, en la novena ranura, lo que se cumple, pues el conductor 17 está en tal ranura. El segundo paso de ranura es 9, es decir, que el conductor 18, que está en la novena ranura debe estar unido a otro que está en la N° 18, que es dos ranuras más adelante del total del rotor, es decir, en la segunda, comenzando desde la primera nuevamente. El paso total de ranuras es 17, luego dos comienzos de bobinas inmediatas eléctricamente como la 1 y la 3, deben distar 17 ranuras, una más del total, lo que es lo mismo que distar una ranura sola, pero después de haber dado la vuelta completa al inducido.

Ubicación de escobillas.

Supuesto un cierto sentido de giro, y con las polaridades magnéticas indicadas en la figura, se puede aplicar la regla de la mano derecha en la siguiente forma: La palma de la mano debe quedar vuelta hacia el polo Norte, que dijimos estaba sobre el dibujo, y no donde aparece en la figura; el pulgar señalará el movimiento de los conductores. Los demás dedos señalan hacia arriba, siendo éste el sentido de las corrientes inducidas, que se han indicado con flechas para cuatro conductores extremos que queden debajo del polo Norte. Debajo del polo Sud, los sentidos de las corrientes serán contrarios, porque la palma de la mano debe quedar apoyada contra el dibujo, y el pulgar señalar la flecha del movimiento, indicando entonces, los demás dedos hacia abajo.

Se nota inmediatamente que a la delga 9 concurren las corrientes provenientes de los conductores 17 y 32; debajo de ella debe estar, entonces, la escobilla positiva. De la delga 1 divergen las corrientes para los conductores 16 y 1, por lo que debajo de ésta estará la escobilla negativa.

Se ve que han quedado debajo del centro de las masas polares y distando entre sí la mitad justa del colector completo, por lo que estarán en posiciones diametrales. Al girar el inducido, es evidente que las escobillas no quedarán debajo de las delgas 1 y 9, pero la suposición de que el rotor estaba detenido, permite fijar la posición de las mismas para ese instante determinado. Como al girar, los conductores van cambiando el sentido de las corrientes, siempre fluirá corriente por la escobilla positiva y entrará por la negativa, en los generadores, y entrará corriente por la positiva y saldrá por la negativa, en los motores.

La figura se ha completado, pues, con la inclusión de los bornes exteriores de la máquina, los que serán conectados con el circuito inductor en la forma como se trató en el capítulo respectivo. Faltaría ahora calcular la sección de los conductores que forman el bobinado, lo que trataremos más adelante.

EJEMPLO DE BOBINADO ONDULADO "CRUZADO" PARA MÁQUINA DE CUATRO POLOS

En forma similar a los casos de devanados en paralelo, trataremos para los tipos serie un ejemplo numérico correspondiente a máquinas tetrapolares, a fin de hacer notar la economía de cobre en los conexiones frontales, y porque en el caso de arrollamientos ondulados no siempre es posible realizarlos en máquinas de cuatro polos, cosa que no sucedía en los imbricados.

Trataremos un bobinado en doble capa, y como la condición de posibilidad lo exige, el número de delgas del colector y de ranuras del rotor, deben ser impares. Supongamos los siguientes datos:

Número de polos (p)	4
Número de ramas en paralelo del devanado, por ser del tipo serie u ondulado (a)	2
Número de ranuras del inducido o rotor (N)	17
Número de delgas del colector o conmutador (K)	17
Número de bobinas a ejecutar, igual al número de ranuras del rotor, por ser bobinado en doble capa	17
Número de lados de bobina por ranura del rotor, por la misma razón anterior	2
Número de escobillas necesarias, por ser devanado ondulado, de cualquier cantidad de polos	2

Tenemos los datos necesarios para encarar el trazado del devanado, previo cálculo de los pasos y verificación de la posibilidad de realizarlo.

Número de lados de bobina.

Será doble del número de bobinas, o del número de ranuras del rotor, como corresponde a cualquier tipo de bobinado en doble capa:

$$Z = 2 \times 17 = 34$$

es decir, que tendremos 34 haces inducidos o paquetes de conductores activos en total.

Condición de posibilidad.

El paso de colector debe ser un número entero y no divisible por el número de delgas, ni el número de delgas divisible por aquél. Para el caso propuesto, se tiene:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\frac{1}{2}\,p} = \frac{17 \pm 1}{2} = 9$$

en donde hemos sumado la unidad al numerador, por lo que se obtendrá

un bobinado tipo cruzado. El paso resulta un número entero, y el número de delgas no es divisible por él (17 no es divisible por 9), con lo que el devanado es realizable.

Nótese que para máquinas de cuatro polos, el paso del colector es aproximadamente igual a la mitad del total del colector, mientras que en las de dos polos resulta aproximada al total de delgas del mismo.

Si se hubiera restado la unidad al numerador, el resultado sería 8, el bobinado también sería realizable y del tipo no cruzado, que trataremos en otro ejemplo.

Paso de ranuras.

El paso resultante de ranuras es igual al de colector, y en nuestro ejemplo resulta:

$$y_n = \frac{N \pm 1}{\frac{1}{2} p} = \frac{17 + 1}{2} = 9$$

Que debe repartirse en los dos pasos parciales, que elegimos 4 y 5 y cuya suma debe dar el resultante:

$$4 + 5 = 9$$

Pasos de bobinado.

Con la fórmula conocida se calcula el paso resultante de bobinado, que es:

$$y = \frac{Z \pm 2}{\frac{1}{2} p} = \frac{34 + 2}{2} = 18$$

habiendo elegido el signo más, porque así lo hicimos para el colector. El paso resultante resulta algo mayor que la mitad del total de conductores, es decir algo mayor que el *paso polar* de que ya se habló en otra oportunidad. Este paso debe repartirse entre los dos pasos elementales de avance de modo que ambos sean impares.

Para que no difieran mucho entre sí y como el total de paso ha resultado un número par, los elegimos iguales, es decir, la mitad del paso resultante.

$$y_1 = y_2 = 9$$

Su suma debe dar el paso resultante, cosa que se cumple, siendo además, ambos impares.

$$9 + 9 = 18$$

Trazado del bobinado.

Con las cantidades calculadas más arriba, se puede proceder al trazado del devanado, que aparece completo en la figura 183.

El desarrollo del inducido consta de 17 ranuras. en cada una de las cuales se colocarán dos conductores. uno superior, con línea llena, y otro inferior,

con línea punteada. Se los numerará del 1 al 34, pues ésta es la cantidad de haces activos.

El colector tiene 17 delgas, que se dejarán sin numerar provisoriamente, como en ejemplos anteriores. Se puede marcar la posición de las masas polares, que son cuatro, dividiendo el largo total del desarrollo del rotor en cuatro partes iguales, y dejando los respectivos espacios en blanco. Se indicará la polaridad magnética en forma alternativa, es decir, comenzando por un extremo, un Norte, un Sud, otro Norte y otro Sud, correlativamente.

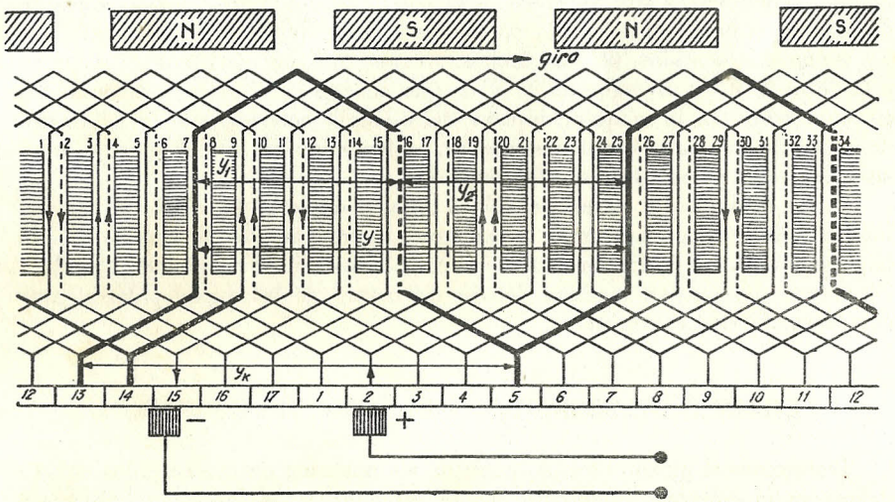

FIG. 183. — Bobinado serie u ondulado "cruzado" para una máquina de cuatro polos.

El primer paso elemental de avance es 9, de modo que el conductor 1 se unirá al 10, por la parte superior, y el 10 debe ser conectado al 19, para cumplir el segundo paso de avance, que es también igual a 9. Entre el 10 y el 1, cuya conexión se hace por debajo, se conectará la delga Nº 2, desde la cual se puede seguir ahora con la numeración.

El paso resultante es 18, por lo que el conductor 1 debe estar en la misma espira que el 19, lo que se cumple. Siguiendo con el devanado, se conectará el 19 con el 28, y éste con el 3, notándose que se ha dado con dos espiras la vuelta completa al inducido. Esto no sucedía en los bobinados imbricados, pues recien se daba la vuelta completa al rotor al terminar el trazado. Del 3 a 12 y de éste al 21, se sigue con el bobinado hasta terminarlo.

El paso de colector debía ser 9, lo que puede comprobarse fácilmente, pues lo hemos indicado en la figura, así como los demás pasos. Los pasos de ranura también se cumplen, pues el conductor 1 está en la primera ranura y el 10, conectado a aquél, está en la quinta, es decir, cuatro ranuras más adelante, como debía ser. El segundo paso era 5, de modo que el conductor conectado al 10 debe estar en la décima, que es la ranura en que está el Nº 19. Lo mismo puede decirse para el paso resultante de ranura.

Ubicación de escobillas.

Esta es la parte más interesante, pues se diferencia de todas las máquinas tratadas hasta aquí. Sabemos que para todo devanado ondulado hacen falta sólo dos escobillas, puesto que siempre hay dos ramas en paralelo en él, cualquiera que sea el número de polos. Veamos cuál es la posición relativa entre ellas.

Como en ejemplos anteriores, aplicamos la regla de la mano derecha, y, para el sentido de giro indicado, obtendremos que debajo de los polos Norte, las corrientes son ascendentes y debajo de los Sud, son descendentes, de modo que omitiremos la descripción para evitar repeticiones inútiles.

Según los sentidos de las flechas, vemos que las corrientes concurren a la delga Nº 15 y divergen de la Nº 2, que no está en el extremo opuesto del colector, como en la máquina bipolar del ejemplo anterior, sino a un cuarto de vuelta de distancia. Las dos escobillas, en las máquinas con devanado ondulado de cuatro polos, estarán a 90° entre sí.

Ya se dijo que, a veces, se coloca mayor número de escobillas que el indispensable, para mejorar la conmutación, pero con dos se cumple con lo imprescindible. En la figura hemos indicado la polaridad de ambas escobillas. Obsérvese que quedan también debajo del centro de las masas polares, pero considerando dos contiguas.

EJEMPLO DE BOBINADO ONDULADO "NO CRUZADO"

Trataremos el mismo ejemplo anterior, de máquina de cuatro polos con 17 delgas en el colector, 17 ranuras en el inducido y 34 lados de bobina en total, es decir, 17 bobinas, pero de modo que el devanado resulte del tipo no cruzado, o de "paso corto".

Evitaremos la repetición de los datos ya mencionados para el ejemplo anterior, pues son idénticos, y partiremos del conocimiento del número total de lados de bobina, o sea, del número de haces inducidos.

Condición de posibilidad.

En lugar de sumar la unidad en el numerador, se la resta, con lo que se obtiene un paso de colector algo más corto, es decir:

$$y_k = \frac{17-1}{2} = 8$$

que también resulta un número entero y no divisible por el número de delgas o viceversa.

Pasos de ranura.

Calculamos el paso resultante de ranura en la forma conocida, aunque ya lo conocemos, dado que él resulta igual a 8, paso de colector. En efecto,

si restamos la unidad en lugar de sumarla la fórmula del paso de ranura da:

$$y_n = \frac{N-1}{\frac{1}{2}p} = \frac{17-1}{2} = 8$$

y separando este paso en dos partes lo más iguales posible, vemos que ellas son 4 y 4, iguales. Luego los pasos parciales de ranura son 4 y 4.

Pasos de bobinado.

Los pasos de bobinado se pueden calcular fácilmente. El resultado se calcula con la fórmula conocida:

$$y = \frac{34-2}{2} = 16$$

que debe repartirse entre los pasos elementales. Obsérvese que el paso resultante es menor que en el devanado cruzado, por lo que se los puede designar a estos bobinados, "de paso corto", diferenciándolos de los anteriores, de "paso largo"

El paso resultante se reparte en dos números enteros e impares, cuya suma sea precisamente dicho paso total. En nuestro ejemplo, tales números pueden ser 9 y 7, porque no deben diferir mucho entre sí. Adoptamos los pasos elementales de avance de 9 y 7 respectivamente, cuya suma es:

$$9 + 7 = 16$$

igual al paso resultante.

Trazado del bobinado.

Procedemos como en los ejemplos anteriores, es decir, comenzando por dibujar las ranuras del inducido en la forma como puede verse en la figura 184. Acto seguido, se coloca en cada ranura dos conductores, uno con línea llena y el otro con línea punteada, y se dibujan las 17 delgas del colector. Se numeran además, los conductores del 1 al 34.

El primer paso elemental es 9, por lo que el conductor 1 estará unido al 10, y, como el segundo paso elemental es 7, el 10 debe unirse por la parte inferior al Nº 17, siguiendo en esta forma, conectando el 17 al 26 por arriba y el 26 al 33 por debajo, hasta terminar el devanado.

En el centro de las conexiones inferiores, se conectan las delgas del colector, numerándolas; así en la conexión que va del conductor 10 al 17 se toma la delga 1, y así sucesivamente.

El paso resultante resulta cumplido, puesto que desde el conductor 1 hasta el 17 hay un paso de 16, que es lo calculado. El paso de colector también ha resultado exactamente, puesto que desde la delga 1 hasta la 9, que es la inmediata eléctricamente, hay un paso de 8, que es el propuesto.

Los pasos de ranura se verifican con toda facilidad, pues los dos valen 4. Luego un conductor o lado de bobina debe unirse siempre a otro que queda 4 ranuras más adelante. Así el Nº 1 se une al que está en la quinta ranura y éste al que está en la novena, y así siguiendo.

Ubicación de escobillas.

También en este caso deben resultar dos escobillas a 90° por tratarse de un bobinado ondulado para máquina de cuatro polos. Veamos los sentidos de las corrientes.

Ubicadas las masas polares, se les asigna una polaridad magnética arbitraria, pero de manera que los polos Norte queden alternados con los Sud. El sentido de giro está fijado en el dibujo, de modo que puede aplicarse la regla práctica ya mencionada, pero recordemos que las corrientes, para el

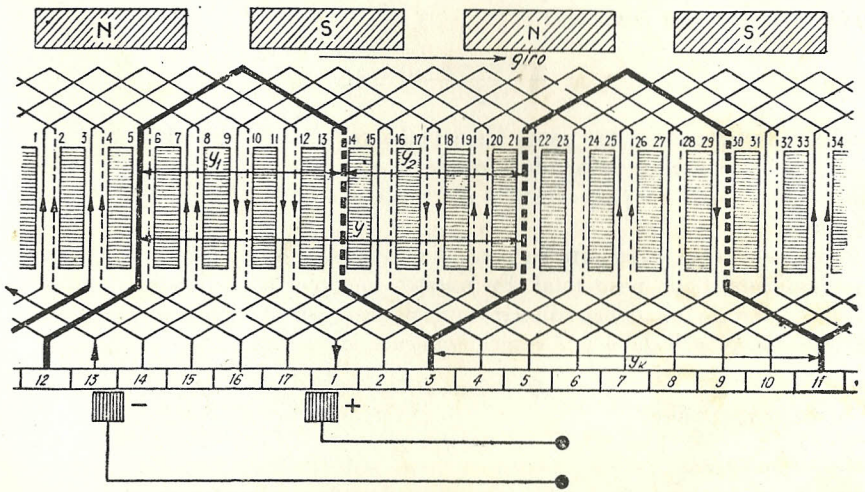

FIG. 184. — Bobinado serie u ondulado "no cruzado" para una máquina de cuatro polos.

giro indicado, eran ascendentes debajo de los polos Norte y descendentes bajo los polos Sud, con lo que pueden indicarse tales sentidos en varios conductores.

Se observa que las corrientes convergen a la delga N° 1, por lo que debajo de ella estará la escobilla positiva, y divergen de la delga 13, colocando entonces la escobilla negativa debajo de ella. Se tienen así indicadas las dos escobillas de la máquina, que resultan ubicadas debajo de los centros de dos masas polares sucesivas, y a un cuarto de vuelta de colector entre sí, es decir, a 90°.

En forma similar se procedería para cualquier clase de devanado ondulado, de distinto número de delgas o ranuras, pero siempre que se cumpla la ecuación de condición dada al comienzo de este capítulo. En el cap. 14 veremos un caso en el que tal condición no se cumple.

CAPÍTULO XIV

BOBINADOS MÚLTIPLES Y SERIE-PARALELO

Hasta aquí se han considerado los bobinados sencillos, ya sean del tipo imbricado u ondulado. En los diversos ejemplos se vió que el número de ranuras coincidía con el número de delgas del colector, de manera que en cada ranura se alojaban dos lados de bobina. Cualquier bobinador experto habrá echado de menos los ejemplos de aquellos devanados que se encuentran con mucha frecuencia, como son los que tienen más de dos lados de bobina en cada ranura, o los que dan más de un ciclo alrededor del rotor.

La necesidad de hacer colectores de mayor número de delgas estriba en la mala conmutación que se obtiene con los que tienen pocas. En cambio, el número de ranuras no puede aumentarse mucho por razones constructivas, pues debería hacerse el rotor con mayor diámetro para alojarlas. Es así como encontramos rotores con doble o triple cantidad de delgas que ranuras, y excepcionalmente más aun.

Los bobinados que se hacen en los inducidos que hemos mencionado se suelen llamar *múltiples*, o de más de dos lados de bobina por ranura, pues llevan cuatro o seis, según el caso. El trazado será estudiado en detalle aunque difiere poco de los simples ya vistos.

En cuanto a los devanados serie-paralelo, son de diseño especial, pues combinan las ventajas de los ondulados, en lo que respecta al equilibrio de ff. ee. mm. en las distintas espiras, y además tienen ramas en paralelo, lo que permite distribuir la corriente en el número de ramas que sea necesario. El tipo más común de bobinado serie-paralelo es el ondulado de dos o más pasos, que tiene más de dos ramas en paralelo a pesar de ser ondulado, pues los simples sabemos que siempre tienen únicamente dos ramas derivadas.

El bobinado serie-paralelo también puede ser múltiple, con varios lados de bobina por ranura en lugar de dos, no presentándose ninguna dificultad en el trazado ni en la ejecución. Con los modelos que se verán como ejemplo se estará en condiciones de abordar cualquier otro caso práctico no considerado, por similitud con tipos parecidos, o haciendo los cálculos en la forma que corresponde.

BOBINADOS IMBRICADOS MÚLTIPLES

Llamaremos bobinado múltiple a aquél que tenga más de dos lados de bobina por ranura, aunque esos lados estén encintados en un solo paquete y aparenten ser sólo dos. Por el número de terminales que salen de la bobina se puede reconocer cuando hay más de dos lados, pues una bobina tiene dos terminales solamente, y si hay cuatro es porque se tienen dos bobinas distintas; si hay seis terminales es porque hay tres bobinas y así sucesivamente. Esas bobinas se pueden empaquetar juntas o separadas, aunque es muy común que el encintado abarque a todas en un grupo.

Todos los cálculos que se han hecho para los devanados imbricados simples pueden ser aplicados a los múltiples, salvo en el detalle de las conexiones al colector, que deberán hacerse en forma distinta. Por de pronto, el paso de un bobinado múltiple es igual al de uno simple, aunque no es forzoso que lo sea, pues se puede hacer distinto. Como es más sencillo hacerlo igual, tomaremos un ejemplo de ese tipo.

Veamos un ejemplo práctico de bobinado múltiple, para que se comprenda rápidamente su mecanismo. Tomaremos un inducido de 24 ranuras, y un colector de 48 delgas, es decir que se tendrán dos delgas por ranura, o lo que es lo mismo, cuatro lados de bobina por ranura. Nos remitimos a la figura 185 para el trazado del bobinado, en la que se han numerado las

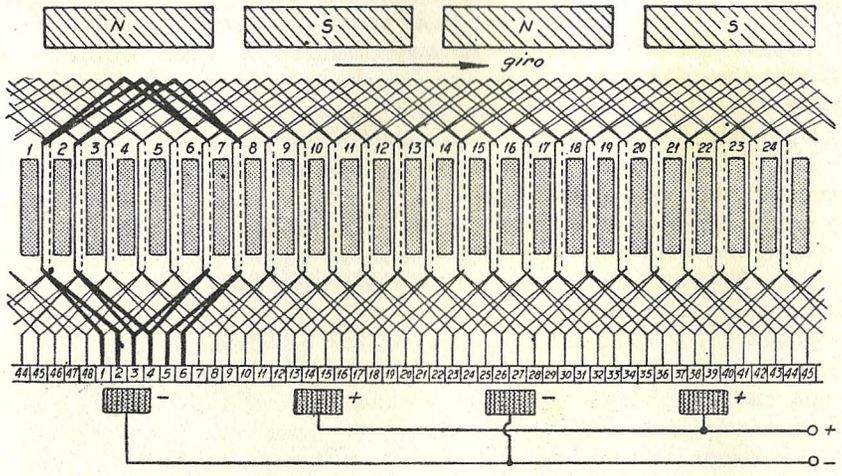

FIG. 185. — Bobinado imbricado múltiple, con cuatro lados de bobina por ranura, para una máquina de cuatro polos.

ranuras y las delgas. Nótese que en este caso hemos numerado las ranuras y no los lados de bobina, porque como hay cuatro de éstos por ranura se introducirían confusiones por el exceso de números. Al numerar las ranuras, quiere decir que nos basaremos en el cálculo del paso de ranuras, que es más práctico, y que en los devanados múltiples evita errores.

Se trata de una máquina con los siguientes datos, según se ve en la figura:

Número de polos (p)	4
Número de ranuras (N)	24
Número de delgas del colector o conmutador (K)	48
Número de bobinas en el rotor	48

Cálculo del paso.

Ya sabemos calcular los pasos de ranura en bobinados imbricados, aplicando la fórmula de los ejemplos dados para los simples:

$$y_n = \frac{N - b}{p}$$

Que en nuestro caso, se resuelve reemplazando los valores tomados de los datos y adoptando para b un número 4 para que el paso resulte impar, como conviene:

$$y_n = \frac{24 - 4}{4} = 5$$

Con lo que el paso de ranura ha resultado igual a 5. Éste es el primer paso en avance, y al mismo tiempo es el ancho normal de todas las bobinas del inducido. El paso de retroceso es una unidad menor, puesto que el paso resultante debe dar igual a la unidad. Se toma 4 ranuras para el paso de retroceso:

$$y'_n = 5 - 1 = 4$$

Y con esto se tienen los dos pasos elementales del bobinado. El primero permite construir las bobinas a mano o en moldes, y el segundo da la pauta para hacer las conexiones entre una bobina y la que está en la ranura inmediata.

Para el paso de colector se harían consideraciones análogas a las de los bobinados simples, aunque ya sabemos que debe dar la unidad, con una salvedad importante: en efecto, no hay que olvidar que en cada ranura tenemos cuatro lados de bobina, de manera que los terminales correspondientes a cada uno de ellos irán a distinta delga del colector. La figura 185 aclara los detalles de esas conexiones.

Trazado del bobinado.

Veamos cómo se ha procedido para trazar el devanado que se ve en la figura. En primer lugar se dibujan las 24 ranuras y las 48 delgas en la forma conocida. Se toman las cuatro zonas polares que representan los dos polos Norte y los dos Sud de la máquina, tal como hemos hecho otras veces. Dibujamos en cada ranura dos rayas, una llena y otra punteada. La línea

llena representa ahora los dos lados de bobina que están en la parte de arriba de la ranura, y la punteada los dos que están en el fondo, pues no debe olvidarse que en cada ranura tenemos cuatro lados de bobina.

Para evitar confusiones, afuera de las ranuras hemos separado la raya gruesa y la punteada en dos partes, para que se note que se trata de dos lados distintos de bobina. Se podría dibujar separadamente dentro de la ranura los cuatro lados, pero se acostumbra a hacerlo en la forma ilustrada; en el próximo ejemplo adoptaremos el otro criterio para mostrar las ventajas que presenta.

Tomemos los pasos de ranura: el de avance es 5 de modo que los dos lados superiores de la ranura Nº 1 deben unirse a los dos inferiores que están 5 ranuras más adelante, o sea en la Nº 6. Y se ve que lo de unir lados superiores con inferiores es igual que en los bobinados simples, sólo que aquí hay dos lados de bobina para unir en vez de uno. De la ranura 6 medimos el paso de retroceso, que es 4, de modo que los dos lados inferiores de la Nº 6 se unirán a los dos superiores de la Nº 2, que están a cuatro ranuras de distancia hacia atrás.

En esta forma se sigue el bobinado, uniendo los dos superiores de la ranura Nº 2 con los dos inferiores de la Nº 7, éstos con los dos superiores de la Nº 3, y etcétera. Así se termina el bobinado sin haber tenido necesidad de emplear los pasos elementales de bobinado, que usábamos ilustrativamente en los tipos simples.

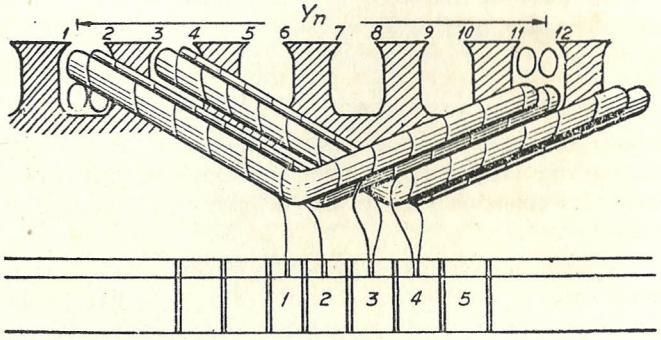

Fig. 186. — Aclaración de las conexiones al colector del bobinado de la fig. 185.

Veamos ahora las conexiones del colector. En la ranura Nº 1 hay cuatro lados de bobina; los dos superiores los debemos unir a las delgas Nº 1 y 2 del colector; los dos inferiores se conectan a las Nº 41 y 42. Los dos lados de arriba de la ranura Nº 2 se unen a las delgas Nº 3 y 4, y así sucesivamente se toman dos delgas cada vez porque cada raya que hay dentro de la ranura representa dos lados de bobina, y tendrá, por consiguiente, dos terminales. Observemos también que a las mismas delgas Nº 1 y 2 vienen los lados inferiores de la ranura Nº 5.

Seguiríamos así trazando las conexiones al colector, pero vemos en seguida

que es muy similar a los bobinados simples, sólo que cada vez se toman dos delgas en vez de una. Lo mismo podemos decir respecto a la ubicación de escobillas; sabemos por los ejemplos de bobinados simples que ellas caen debajo de los centros de los polos dibujados, y allí las colocamos. El ancho de cada escobilla es mayor que en los casos de devanados simples, pues debe abarcar un mínimo de dos delgas.

Es interesante aclarar cómo quedan las conexiones de los terminales que salen de las bobinas y que van al colector. Para ello observemos la figura 186, donde se pueden notar los cuatro lados de bobina que hay en cada ranura, dos superiores y dos inferiores, y las correspondientes conexiones al colector. Hemos hecho aparecer a las bobinas con encintado independiente, pero ello no es necesario, pues es más común que las dos bobinas que se colocan juntas, y que cumplen idéntico paso, se envuelvan con una cinta que las una. En tal caso, de un lado salen dos terminales y del otro, los otros dos.

Si se tratara de un bobinado imbricado de seis lados de bobina por ranura, el procedimiento es completamente similar al precedente, sólo que las rayas gruesas dentro de las ranuras representarían tres lados de bobina, y las punteadas otros tantos. Habría el triple de delgas que ranuras.

BOBINADOS ONDULADOS MÚLTIPLES

Así como hemos puesto un ejemplo de bobinado imbricado que tenía doble número de bobinas que ranuras, es decir con cuatro lados de bobina por ranura, trataremos el caso similar, pero para un bobinado ondulado. Para ilustrar mejor sobre la forma de dibujar devanados, adoptaremos una representación algo diferente.

Tomaremos un caso de máquina con pocas ranuras, para hacer una representación bien clara que sirva de modelo para el trazado de los más complicados, no por ser diferentes, sino por la cantidad de líneas y conexiones a dibujar.

Sea, por ejemplo, una máquina de las siguientes características, de acuerdo con lo que se haya tomado en la práctica:

Número de polos (p)	4
Número de ranuras (N)	11
Número de delgas del colector (K)	22
Número de bobinas en el rotor	22

Y trataremos de diseñar un bobinado ondulado para esta máquina, por lo que sabemos que se necesitan sólo dos escobillas, de acuerdo a lo visto en los ondulados simples; que se tendrán dos ramas en paralelo, aunque aquí hay que aclarar que no se puede extender la teoría de los simples a los múltiples, pues si se hace el equivalente eléctrico del bobinado se verá que hay cuatro ramas en paralelo, aunque cada par de ellas estén encimadas y en las mismas ranuras. Podría hablarse entonces de un devanado en serie y paralelo, lo primero por ser ondulado y lo segundo por tener dos ramas

en paralelo en cada mitad; sin embargo, reservamos la denominación de serie-paralelo para otros tipos que trataremos más adelante.

Cálculo del paso.

También en este caso dejaremos de lado los pasos elementales o de bobina, pues introducen confusiones. Nos quedaremos con los pasos de ranuras, que sabemos más prácticos y modernos. En los ondulados simples estudiamos la forma de calcular el paso total de ranura, con la fórmula:

$$y_n = \frac{N-1}{\frac{1}{2}\,p}$$

Y que aplicada ahora, con los datos que tenemos, resulta

$$y_n = \frac{11-1}{2} = 5$$

Quiere decir que el paso total de ranura será de 5 ranuras. Se debe repartir este paso en los dos elementales, que tomamos de 2 y 3 ranuras respectivamente; se cumple la suma:

$$2 + 3 = 5$$

Es decir que la suma de los pasos elementales es igual al paso resultante, como es lógico.

Omitimos considerar la condición de posibilidad, porque se eligió un ejemplo realizable, aunque es fácil comprobar si se cumple. El paso de colector debe ser un número entero e indivisible por el número de delgas y viceversa, como se estipuló anteriormente. El paso de colector, en los bobinados simples se calculaba con la expresión:

$$y_k = \frac{K-1}{\frac{1}{2}\,p}$$

Pero en los múltiples hay que tener en cuenta que hay doble o triple número de delgas que ranuras, de manera que el paso de colector será:

$$y_k = \frac{K-n}{\frac{1}{2}\,p}$$

Donde la cantidad n es el número de veces que hay más delgas que ranuras. En nuestro ejemplo tenemos doble cantidad de delgas que ranuras, luego se tiene:

$$n = 2$$

Con lo que pasamos a calcular ese paso, y se tiene:

$$y_k = \frac{22-2}{2} = 10$$

Que es entero y no se puede dividir por 22 ni se divide por 10, de modo que el bobinado es realizable.

Trazado del bobinado.

Tenemos calculados los pasos de ranura, para ejecutar el bobinado y trazarlo, y el paso de colector para las conexiones respectivas. Vemos el dibujo correspondiente, que se muestra en la figura 187. Se han dibujado los cuatro lados de bobina en cada ranura, a diferencia de lo que hicimos para el imbricado múltiple, a fin de disponer de ejemplos en las dos formas distintas. Los dos lados superiores de bobinas que están en cada ranura se trazan llenos y los dos inferiores, punteados. Este tipo de dibujo permite apreciar que el

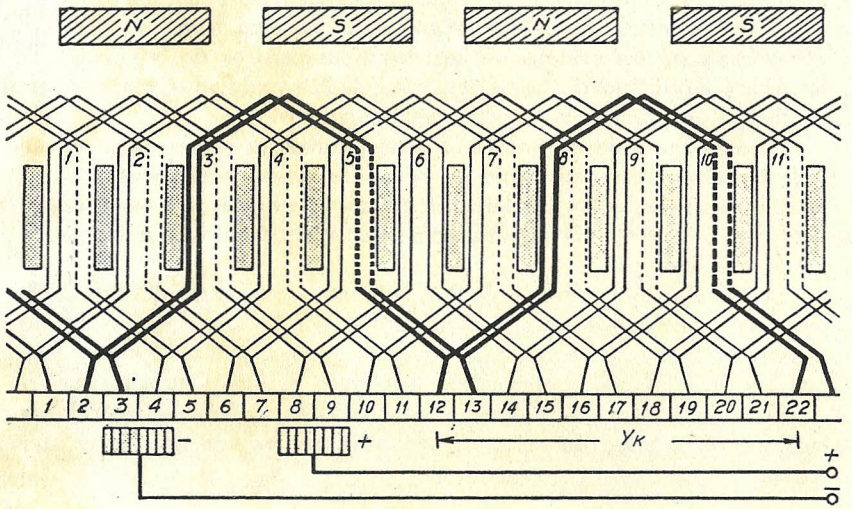

FIG. 187. — Bobinado ondulado múltiple, con cuatro lados de bobina por ranura, para una máquina de cuatro polos.

bobinado múltiple no es otra cosa que dos bobinados completos, o tres, superpuestos en todo su recorrido, salvo en las conexiones al colector.

Para cumplir los pasos, tenemos que los dos lados superiores de la ranura Nº 1 se unirán a los dos inferiores de la Nº 3, porque el primer paso de avance es de 2 ranuras; los dos inferiores de la Nº 3 se unen a los dos superiores de la Nº 6, porque el segundo paso de avance era de 3 ranuras. El paso total resulta así 5 ranuras. En esa forma seguiríamos de la Nº 6 a la Nº 8 y de ésta a la Nº 11, siempre de arriba hacia abajo, y de abajo hacia arriba, según se sabe. Se ha trazado más gruesa una parte del bobinado para seguir los pasos con facilidad.

Las conexiones al colector se hacen en la forma conocida. El paso es 10, de manera que si el lado Nº 1 de la ranura Nº 3, por ejemplo está unida a la delga Nº 2, la próxima conexión al colector, siguiendo el bobinado, estará 10 delgas más adelante, es decir, en la Nº 12. Y así las demás conexiones. Nótese que los dos lados superiores de cada ranura quedan

unidos a delgas contiguas del colector, igual que en los imbricados múltiples.

Para la ubicación de escobillas no hacemos más que seguir las normas dadas en los bobinados simples, pues hay entera similitud en tal detalle. Con esto quedaría trazado el bobinado, motivo del ejemplo propuesto.

BOBINADOS SERIE-PARALELO

La posibilidad de realizar bobinados ondulados que tengan más de dos ramas en paralelo no está únicamente en los tipos múltiples, que requieren gran número de delgas en el colector. Los tipos serie-paralelo dan la misma ventaja y pueden tener tantas delgas como ranuras haya en el inducido. Se aprovechan así las ventajas de los dos tipos clásicos de bobinados: la regularidad y equilibrio de las ff. ee. mm. de los ondulados y la derivación de corrientes en muchas ramas, de los imbricados.

La apariencia de un bobinado serie paralelo es similar a la de uno múltiple ondulado, pero en lugar de llevar los dos o más devanados juntos en las mismas ranuras, se los lleva en ranuras contiguas. Se suele decir que se dan dos o más pasos simultáneamente, aunque tal afirmación no parece ser la más indicada.

El cálculo de los pasos de los bobinados serie-paralelo difiere un poco del de los bobinados simples y múltiples, por lo que daremos las fórmulas necesarias. Nos referiremos a los pasos de ranura, por ser los más usuales, ya que los de bobinado o elementales son poco prácticos en estos casos.

En primer lugar, un bobinado serie-paralelo no tiene solamente dos ramas en paralelo, a pesar de ser ondulado, sino que se cumple que el número de ramas:

$$a = 2n$$

Es decir que se adoptan 2 n ramas en paralelo. Y esta cantidad n interviene en los cálculos de los pasos, en la forma que se verá en seguida. En realidad, n es el número de veces que se aumentan las ramas en paralelo que habría normalmente.

El paso de ranura, o paso resultante, se calcula con la siguiente expresión:

$$y_n = \frac{N - n}{\frac{1}{2}\, p}$$

Donde N es el número de ranuras, n el de pares de ramas del bobinado y p el de polos, según ya se sabe. En la práctica se utiliza valores de n de 2 a 4, de modo que n tiene esos límites. Si n vale 1, se trata de un bobinado simple y no serie-paralelo.

El paso de colector se calcula con la expresión, similar a la anterior, que tiene en cuenta el número de delgas K del colector:

$$y_k = \frac{K - n}{\frac{1}{2}\, p}$$

Es decir que si hay tantas delgas como ranuras, los pasos totales de ranura y de colector son iguales. Si hay doble delgas que ranuras no se cumple eso. La condición de posibilidad es la misma que para los ondulados simples o múltiples, es decir, que el paso de colector debe ser entero e indivisible por el número de delgas y viceversa.

Como característica notable de los bobinados serie-paralelo se tiene que el último lado de bobina de una vuelta completa al inducido no queda en la ranura contigua al primero, sino que queda apartado de n ranuras. Dicho en otra forma, si se ha adoptado que n = 2, es decir que se tendrán 4 ramas en paralelo en lugar de las dos normales que siempre hay en todo bobinado simple, el último lado de bobina de una vuelta al rotor no quedará en la ranura inmediatamente anterior a la primera, sino que estará dos ranuras atrás. Y si n tuviera otro valor como 4, por ejemplo, el último lado de una vuelta al inducido estaría 4 ranuras más atrás que el primer lado de esa sección o vuelta. Todo esto se entenderá con más facilidad en un ejemplo numérico, pues el dibujo nos va a permitir entrar en detalles que son poco claros al describirlos.

Ejemplo de un bobinado serie-paralelo

Supongamos que se tiene un inducido de 16 ranuras, correspondiente a una máquina de cuatro polos, con 16 delgas en el colector. Y supongamos también que, de acuerdo con la velocidad de rotación y la f.e.m. normal, se deban tener más de dos ramas en paralelo en el bobinado, por ejemplo 4.

La solución inmediata sería hacer un bobinado imbricado, que da tantas ramas en paralelo como polos tenga la máquina. Pero si se quiere hacer uno ondulado, por las ventajas citadas en varias oportunidades, anteriormente, hay que recurrir a un tipo serie-paralelo, pues el ondulado sólo da dos ramas en paralelo.

Se adopta pues, un bobinado serie-paralelo, en el cual, para que se tengan 4 ramas en paralelo, se tomará:

$$n = 2$$

Pues así tendremos que:

$$a = 2n = 4$$

Y sabemos que a es el número de ramas en paralelo del devanado. Ahora pasamos al diseño, para lo que debemos calcular los pasos.

El paso resultante de ranuras se calcula con la fórmula dada últimamente, y en nuestro caso, se tiene que:

$$N = 16$$
$$n = 2$$
$$p = 4$$

Con cuyos datos se pasa a aplicar la fórmula del paso, y tenemos:

$$y_n = \frac{16 - 2}{2} = 7$$

De modo que el paso resultante es 7, y lo repartimos en los dos pasos elementales, 3 y 4, con lo que se tiene que el primer paso de ranura vale:

3 ranuras

y el segundo paso de ranura en avance vale:

4 ranuras

siendo la suma de ellos el resultante, 7 ranuras. No mencionaremos los pasos elementales de bobina.

Respecto al paso de colector, hemos dicho que cuando hay tantas delgas como ranuras resulta igual al resultante de ranuras, de manera que:

$$y_k = 7 \text{ delgas}$$

Con lo cual se procede a trazar el bobinado que se puede ver terminado en la figura 188. Primeramente numeramos las ranuras y las delgas del colector. Colocamos los polos y dibujamos en cada ranura dos líneas, una llena y otra punteada, como otras veces.

Tomemos el lado lleno o superior de la ranura Nº 1 para comenzar el

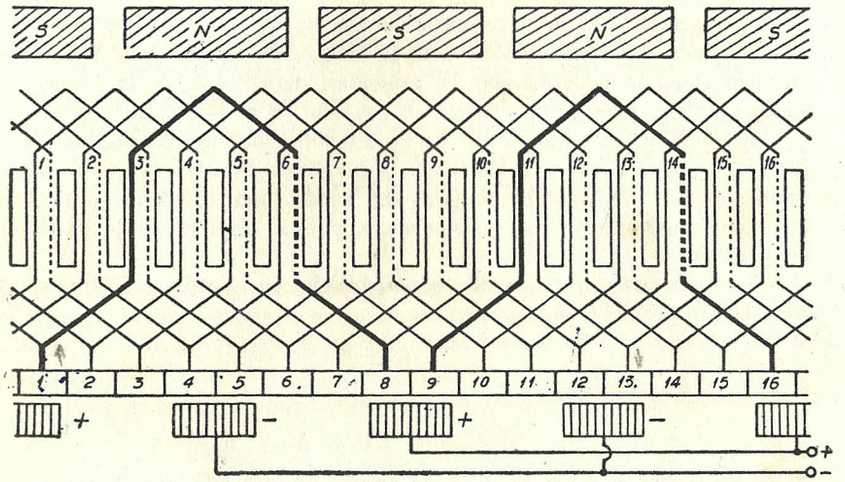

FIG. 188. — Bobinado serie-paralelo para una máquina de cuatro polos.

trazado. Sabemos que el primer paso es 3, con lo que unimos al lado inferior o punteado que está tres ranuras más adelante, es decir, en la Nº 4. De aquí cumplimos el segundo paso en avance, que es 4, por lo que este lado inferior será unido al superior que está 4 ranuras más adelante, o sea en la Nº 8. Así siguiendo se cumple un paso 3 y otro 4, y llegamos a la Nº 15, que no es la última. Vemos en seguida lo que quería decir que el último lado en una vuelta al rotor no quedaba en la ranura contigua al primero, pues el primer lado está en la Nº 1 y el último en la Nº 15, dos ranuras más atrás.

También puede notarse que el trazado aparenta tener dos bobinados que corren paralelamente a lo largo del inducido, separados por una ranura. Para verlo mejor se ha marcado más grueso una sección de cada uno de ellos. Las escobillas se encargan de poner en paralelo esas dos ramas, para lo cual tendrán el ancho necesario.

La ubicación de escobillas, polaridad de las mismas, etcétera, se marca en la misma forma que para los bobinados simples, de manera que no insistiremos en ello.

BOBINADOS ESCALONADOS

Entre los bobinados múltiples que tienen más de un lado de bobina por capa en cada ranura del rotor, hay muchos que escapan a los ejemplos puestos anteriormente. Por ejemplo, para mejorar la conmutación en el colector se emplean algunas veces los devanados de paso irregular o a bobinas diferentes, que se denominan *escalonados*. En estos tipos hay por lo menos dos dimensiones distintas de bobinas y entonces los conductores activos de cada bobina no están eléctricamente unidos a la misma delga del colector, sino que abarcan dos o más delgas. Es evidente que la conmutación mejorará por ese solo detalle.

Los bobinados escalonados pueden ser imbricados y ondulados, pues el trazado general no difiere de las consideraciones hechas con anterioridad. De los muchos posibles daremos solo dos ejemplos para que sirvan de orientación al lector.

Bobinado escalonado imbricado

Sea una máquina de 14 ranuras en el rotor y 28 delgas en el colector, con cuatro polos. Se desea trazar para la misma un bobinado imbricado escalonado, el cual puede verse en la figura 189.

Lo primero que hacemos es calcular el paso por el método conocido, pero encontramos la manera de hacer aparecer el escalonamiento tomando un doble signo en la fórmula que da el paso de ranura:

$$y_n = \frac{14 \pm 2}{4} = 3 \text{ y } 4$$

$$y'_n = 2 \text{ y } 3$$

$$y_k = 1 \text{ y } 2$$

Con cuyos datos podemos hacer el trazado que se ve en la figura. En cada ranura habrá cuatro lados de bobina, dos por capa, y en el trazado más grueso se observa la característica de los bobinados escalonados: una bobina tiene paso menor que el polar y la otra mayor, de manera que al colocar las dos bobinas diferentes en el rotor, en la ranura 2 tenemos un lado de una bobina cuyo otro lado va en la 5 y la otra bobina, en cambio, tiene el otro lado

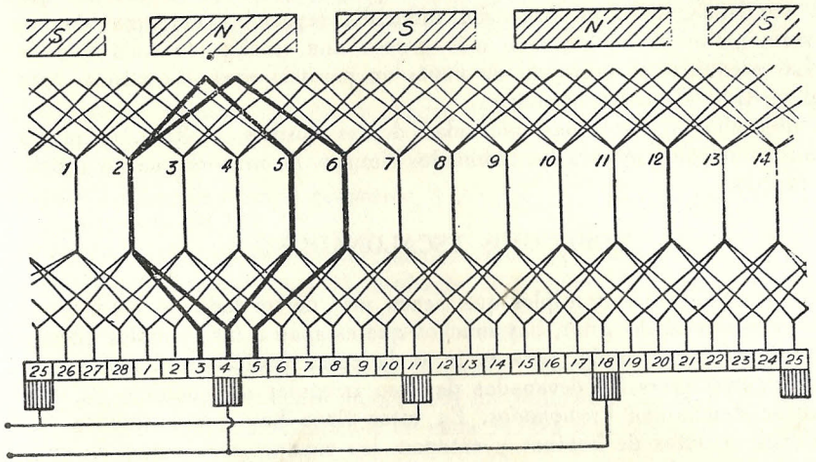

FIG. 189. — Bobinado imbricado escalonado con cuatro lados de bobina por ranura, o sea doble capa con dos lados por capa.

en la ranura 6. De este modo, en lugar de usar dos delgas de colector, como en otros bobinados múltiples, usamos tres, pero esto no quiere decir que se requieran más delgas, pues siempre tenemos dos delgas por cada ranura.

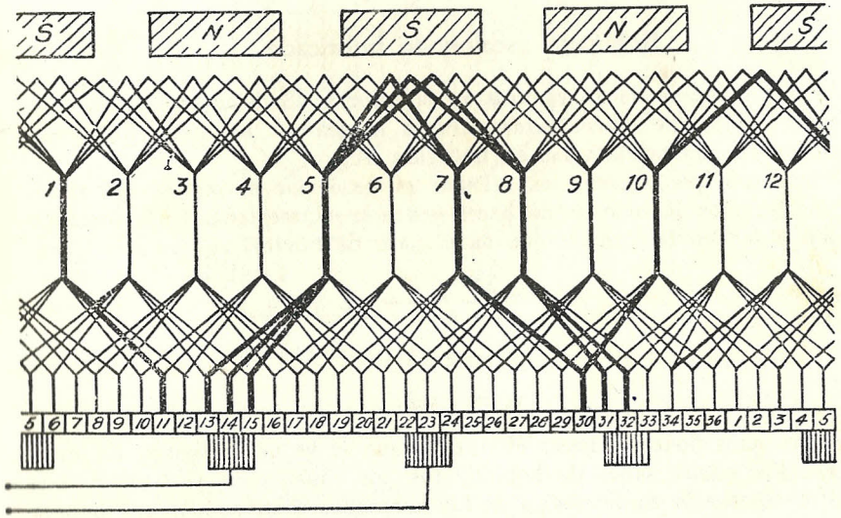

FIG. 190. — Bobinado ondulado escalonado con cuatro lados de bobina por ranura, o sea doble capa con dos lados por capa.

Bobinado ondulado escalonado

A simple título de ejemplo, daremos el trazado de un bobinado escalonado del tipo ondulado, para un inducido de 12 ranuras y un colector de 36 delgas, siendo la máquina tetrapolar. Este caso nos servirá para hacer una consideración muy importante (ver fig. 190).

En la teoría general de los bobinados ondulados, poníamos una condición de posibilidad que era:

$$y_k = \frac{K \pm n}{\frac{1}{2}\,p} = \text{número entero}$$

en cuya expresión el paso de colector estaba dado por el número K de delgas al que sumábamos o restábamos el número de pares de ramas, o sea las veces que había más delgas que ranuras, y dividíamos por la mitad del número de polos. No mencionamos la posibilidad de trazar bobinados que no cumplieran con ese requisito. En el ejemplo que damos de bobinado ondulado escalonado, que pertenece a la categoría de los múltiples, el número de ranuras es 12 y el de delgas es 36, luego tendremos que $n = 3$ y si aplicamos estos números a la fórmula resulta que el paso de colector no es un número entero. Sin embargo el trazado demuestra que se puede realizar. Se ha tomado un paso de colector calculado de la siguiente manera:

$$y_k = \frac{K - 2}{2} = \frac{36 - 2}{2} = 17$$

Los pasos de ranura se han tomado, como corresponde a los bobinados escalonados, de dos medidas diferentes, que resultaron en este caso:

$$y_n = 2 + 3 = 5$$

$$y'_n = 3 + 3 = 6$$

Que resultan de restar al número de ranuras las cifras dos y cero, respectivamente, y dividiendo por la mitad del número de polos, que es 2. La figura 190 nos muestra el trazado completo, en el cual comprobamos que hay tres lados de bobina por capa, o sea seis lados en total por ranura, habiendo bobinas de dos medidas diferentes. Asimismo, comprobamos que hay en el bobinado $2 \times 3 = 6$ ramas en paralelo.

CAPÍTULO XV

CONEXIONES EQUIPOTENCIALES

En todo lo que hemos visto en los capítulos anteriores sobre bobinados, hemos supuesto una distribución uniforme del campo magnético en la periferia del rotor, entendiendo que tal uniformidad corresponde a una sinusoide, con las cretas debajo de los polos y los nodos exactamente en las líneas de escobillas. Para que tal condición se cumpla se requieren algunas condiciones algo difíciles de llenar con la exactitud requerida.

Primeramente, debemos tener flujos absolutamente iguales producidos en cada masa polar, para lo cual, aparte de construir dichas masas con dimensiones muy regulares, los bobinados que las envuelven deben ser absolutamente iguales. Después, los circuitos magnéticos abarcados por cada polo deben ser absolutamente iguales entre sí, cosa más o menos fácil de cumplir para las partes de hierro, pero no para el entrehierro que es la sección de mayor influencia, tal como pudimos comprobarlo en el capítulo 10. La colocación excéntrica del rotor, en pequeñísima proporción, ocasiona asimetrías magnéticas que bastan para introducir desequilibrios en los flujos magnéticos de los distintos polos.

Todo lo dicho se traduce en que la distribución del campo magnético a lo largo de la periferia del rotor no será ya una sinusoide perfecta sino que contendrá deformaciones que se traducen en armónicas. Como las bobinas del devanado tienen sus lados debajo de polos distintos, esas diferencias magnéticas se traducirán en inducción de ff.ee.mm. que harán circular corrientes parásitas que no salen al circuito exterior y que empeoran notablemente la conmutación por chisporroteo en las escobillas. Estas corrientes alcanzan intensidades considerables porque la única resistencia que encuentran en su camino es la de la espira del bobinado y la del contacto delga-escobilla, ambas cifras bajas que hacen que muy pequeñas ff.ee.mm. hagan circular corrientes grandes.

Veamos con mayores detalles cómo se producen los desesquilibrios mencionados, para lo que nos remitimos a la figura 191. Vemos allí una máquina de cuatro polos, con inducido en anillo para simplificar la explicación. Por

razones constructivas o de colocación del rotor, los flujos de dos de los polos están debilitados en 1 % y los de los otros dos reforzados en la misma proporción, con respecto al valor normal medio. Consideremos primero, como ejemplo, las dos escobillas positivas que están en paralelo. Normalmente deberían tocar puntos de igual tensión instantánea, o sea que entre la espira que toca la escobilla positiva superior y la que toca la inferior, no debería haber ninguna diferencia de potencia y en consecuencia las corrientes de carga saldrían de las dos escobillas positivas hacia el borne positivo de la máquina y de aquí al circuito de consumo.

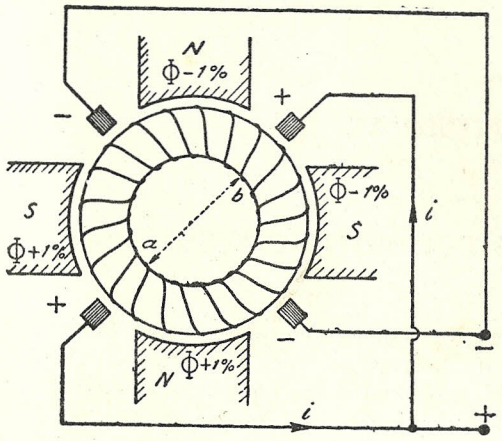

FIG. 191. — La disimetría del campo magnético hace circular corrientes por los puentes entre escobillas y para remediar eso se emplean las conexiones equipotenciales.

Pero la disimetría magnética señalada hace que las espiras que están tocando en ambas escobillas positivas corten flujos magnéticos distintos, con lo que las ff.ee.mm. inducidas en ellas no serán iguales, o lo que es lo mismo. entre esas dos espiras habrá una diferencia de potencial; siendo mayor el flujo en la inferior lo será la f.e.m. y por consiguiente habrá circulación de corriente entre la escobilla positiva inferior y la superior, corriente que hemos llamado *i* en la figura. Esta corriente circula por encontrar un circuito cerrado, y la resistencia del mismo es la del cable del paralelo entre escobillas, la de los contactos delga-escobillas, y la del bobinado, todas cifras muy bajas, de modo que aunque la diferencia de potencial sea muy pequeña, como lo es, la intensidad será grande.

Nos encontramos así que, además de la corriente de carga que sale de la máquina al circuito de consumo, pasa por los contactos entre escobillas y delgas otra corriente, que no se aprovecha, y que empeora la conmutación, por lo que hay que tratar de reducirla o eliminarla. Eso es lo que se consigue con las *conexiones equipotenciales* o de compensación, que estudiaremos de inmediato.

Distinguiremos tres clases de conexiones equipotenciales de las cuales, las de primera clase son para corregir la anomalía que hemos explicado, o sea la emanada de la asimetría de los circuitos magnéticos correspondientes a cada polo.

CONEXIONES EQUIPOTENCIALES DE PRIMERA CLASE

Si en la figura 191 unimos con un puente los puntos *a* y *b* del bobinado, la diferencia de potencial entre esos puntos, producto de la disimetría magnética, se elimina, o hará circular una corriente por el cable de unión entre esos puntos. Entonces no pasará corriente por el puente entre las escobillas positivas, ya que encuentra un camino de menor resistencia en el cable *ab*.

Ese puente, y todos los similares que se hagan en el bobinado, se denominan precisamente: conexiones equipotenciales, y consisten en uniones direc-

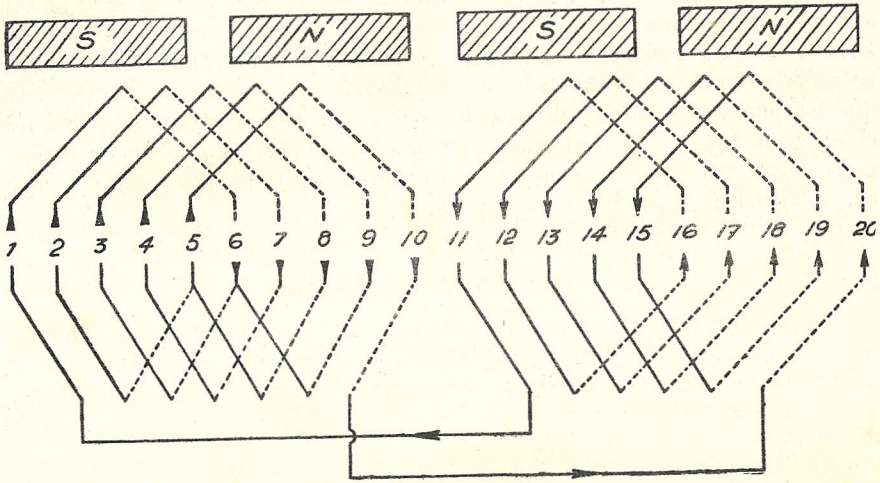

FIG. 192. — Forma de ejecutar las conexiones equipotenciales en un bobinado imbricado simple.

tas en forma de anillo entre puntos de igual potencial en el devanado. Claro que esos puntos están teóricamente al mismo potencial, pero no prácticamente, de ahí la necesidad de conectarlos entre sí. Esos puentes se colocan generalmente en el extremo del rotor opuesto al colector, y conducen corrientes a veces grandes, por lo que calientan considerablemente, pero por tener buena ventilación ya que el rotor gira, ello no constituye un problema. En cambio se logra disminuir las chispas debajo de las escobillas, reduciéndolas a las normales de una máquina de construcción tan perfecta como lo exige la teoría. Los cables para tales puentes se hacen con la misma sección que la del bobinado.

Cuanto mayor sea el número de anillos de compensación o conexiones equipotenciales tanto mejor será la conmutación, pero por razones prácticas no se colocan todas las posibles, sino algunas, hasta conseguir mejorar la conmutación y disminuir las chispas a proporciones aceptables. En los bobinados ondulados, los conductores de una misma espira están al mismo tiempo

debajo de distintas masas polares, por lo que no se producen los efectos descriptos y no son necesarias estas conexiones de compensación; no obstante, veremos que se usan lo mismo, pero de otra clase y por diferentes razones.

Veamos cómo se realizan las conexiones equipotenciales en los bobinados imbricados, los que, para esta cuestión, pueden ser equiparados al bobinado en anillo de la figura 191. En la figura 192 vemos el trazado simplificado de un bobinado imbricado para una máquina de cuatro polos con 20 ranuras en el rotor. No se han dibujado las conexiones al colector, para simplificar el dibujo.

Supongamos haber unido con puentes los lados correspondientes a las ranuras 1 con 11 y 10 con 20. Los flujos de los polos S y N de la izquierda son mayores que los de los dos de la derecha. En consecuencia, y de acuerdo a lo visto anteriormente, circularán corrientes por las conexiones equipotenciales con el sentido indicado por las flechas en esas conexiones. De modo que los puentes hechos entre esas dos bobinas tienen el mismo objetivo que el *ab* de la figura 191. Del mismo modo se hacen las otras conexiones equipotenciales entre puntos simétricos del bobinado, pero hay que ver antes cuándo pueden y cuándo no pueden hacerse.

Condición de posibilidad

No siempre es posible ejecutar las conexiones de compensación. Para que se puedan colocar, debe haber una relación determinada entre el número de delgas del colector, el número de lados de bobina por ranura y el número de polos. Esta relación es:

$$\frac{K}{n \; \frac{1}{2} \; p} = \text{número entero}$$

es decir, que dividiendo el número de delgas por el producto del número de lados de bobina por ranura (n) y de la mitad del número de polos, se debe obtener un número entero.

El número de anillos de compensación a colocar, debe elegirse de modo que sea un número que divida a la vez a la cantidad de polos y a la cantidad de lados de bobina por rama de bobinado. El paso de compensación o la cantidad de conductores que median entre la conexión a un anillo y la conexión próxima al mismo anillo, es:

$$y_c = \frac{K}{\frac{1}{2} \; p}$$

es decir, es igual al cociente entre el número de delgas del colector y la mitad del número de polos.

Para facilitar la ejecución de las conexiones equipotenciales, se acostumbra a hacer una tabla con las bobinas que deben conectarse a cada anillo, indicando el orden de los puentes y la cantidad de puentes posibles.

La mejor forma de aclarar lo dicho más arriba, es hacer un ejemplo numérico.

Ejemplo numérico

Supongamos tener una máquina de 8 polos, con 80 ranuras en el inducido y 80 delgas en el colector, cuyo devanado es del tipo de doble capa.

Verifiquemos la condición de posibilidad. La cantidad de delgas K es de 80; la cantidad de lados de bobina por ranura, por ser de doble capa es n = 2; la mitad del número de polos es 4. Tendremos entonces:

$$\frac{80}{2 \times 4} = 10$$

que resulta ser un número entero, luego es posible efectuar conexiones equipotenciales.

Veamos el número de anillos de compensación a colocar. La cantidad de ramas en paralelo en todo devanado imbricado es igual al número de polos, es decir:

$$a = p$$

con lo que nuestra máquina tendrá 8 ramas en paralelo; luego, cada rama tendrá la octava parte de lados totales de bobina que hay, que son 160. La octava parte, es decir, la cantidad de lados de bobina por rama del devanado es:

$$\frac{Z}{a} = \frac{160}{8} = 20$$

luego, la cantidad de anillos de compensación será un número que pueda dividir a 20 y a 8 (número de polos) simultáneamente. Tal número es 1, 2 ó 4, de modo que pueden hacerse, 1, 2 ó 4 anillos de compensación. Haremos cuatro, que no es un número excesivo, por lo que no se presentarán dificultades en la colocación de los mismos.

El paso de compensación está dado por el cociente entre el número de delgas y la mitad del número de polos, es decir, en este caso:

$$y_c = \frac{80}{4} = 20$$

de modo que el conductor Nº 1 debe unirse, en puente, con el 21, el 41, el 61, el 81 y así los demás anillos.

Para facilitar la comprensión del resultado de los cálculos, se puede hacer una tabla como la siguiente:

Anillo de compensación Nº	Números de lados de bobinas unidos entre sí				
1	1	21	41	61	81
2	5	25	45	65	85
3	9	29	49	69	89
4	13	33	53	73	93

Para completar el ejemplo, la figura 193 muestra una parte del devanado de la máquina propuesta, mostrando las conexiones equipotenciales de los cuatro anillos de compensación adoptados. Sólo se ha representado la cuarta

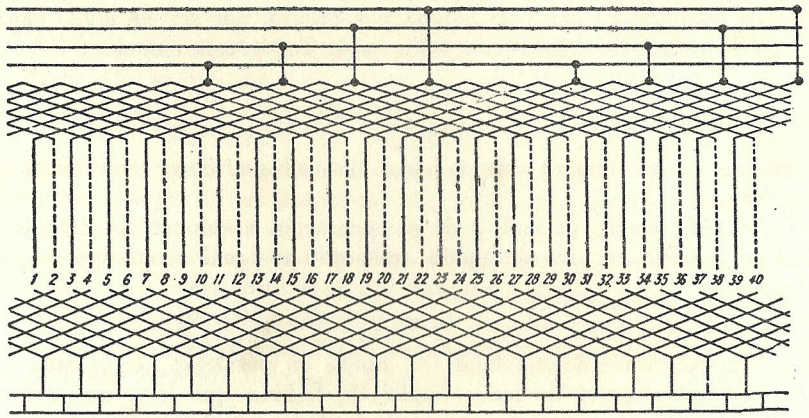

FIG. 193. — Conexión de los anillos de compensación en el bobinado del rotor.

parte del devanado, para simplificar la figura, y por que no habrá dificultad en extenderlo a todo el resto.

Los anillos son cerrados, y como se dijo, se colocan en el extremo del rotor opuesto al colector.

CONEXIONES EQUIPOTENCIALES DE SEGUNDA CLASE

En los bobinados ondulados la disimetría que se produce por construcción algo distinta de los polos entre sí, no tiene influencia importante en la existencia de corrientes de circulación, porque los distintos lados de una espira están al mismo tiempo bajo varias masas polares, pero en cambio, la posición de las escobillas, debido a la existencia de número impar de delgas, no es simétrica con respecto al colector. Es claro que esto se refiere a las máquinas multipolares, porque las bipolares pueden tener número par de delgas.

Como al apoyar una escobilla en una lámina determinada del colector, la opuesta no apoya en la misma forma en la otra lámina, sino que abarcan partes distintas de delgas, las corrientes no se reparten en igual forma en las dos ramas del devanado del rotor. La conmutación se hará, entonces, irregular.

Esto sucede en grado notable para los devanados ondulados múltiples, y puede evitarse, o por lo menos reducirse, empleando las conexiones de compensación ya vistas.

En realidad, el objeto de las conexiones equipotenciales es muy distinto en los devanados ondulados que en los imbricados, y hasta resulta perjudicial

que los anillos conectados en los primeros funcionen como si se tratara de bobinados imbricados. Para evitarlo, los anillos deben unir siempre vueltas completas del devanado, es decir, grupos de una cantidad de lados de bobina igual a $\frac{1}{2}p$ o a un múltiplo de esta cantidad.

La condición matemática de posibilidad es que:

$$\frac{p}{4} = \text{número entero}$$

lo que dice que las conexiones de compensación sólo serán posible para ciertas máquinas, en los devanados ondulados.

Veamos un ejemplo de conexiones equipotenciales de segunda clase para un bobinado ondulado. La figura 194 nos muestra un bobinado ondulado

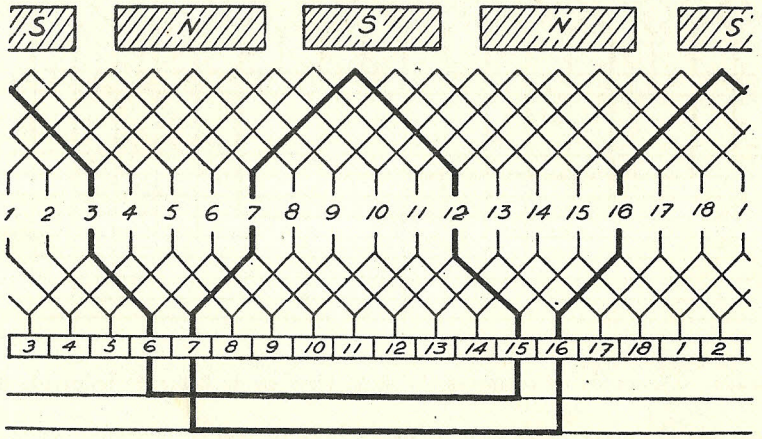

FIG. 194. — Conexiones de compensación de 2ª clase en un bobinado ondulado múltiple.

con 18 ranuras, para una máquina de cuatro polos, en el que se han marcado dos conexiones equipotenciales. Como la máquina es de cuatro polos, es posible hacerlas, de acuerdo a la condición expresada.

Las conexiones realizadas, que toman delgas consecutivas de a pares, conectan en paralelo dos pares de bobinas que deberían estar al mismo potencial, y que por las razones expuestas no lo están.

Conexiones de segunda clase en bobinados imbricados múltiples

En los bobinados imbricados dobles también se hacen necesarias las conexiones equipotenciales de segunda clase, para dividirlos en dos partes que tengan lo más igual posible la tensión entre delgas sucesivas de cada sección del bobinado. Los puntos a unir entre sí deben estar separados por un paso que sea impar.

En la figura 195 se representa como ejemplo un bobinado imbricado

doble, de una máquina de cuatro polos con igual número de ranuras que delgas en el colector. Las conexiones equipotenciales deben conectar en paralelo siempre dos lados de bobina que pertenezcan a distintas ramas del bobinado general. Por ejemplo, los lados 1 y 10 pertenecen a distintas ramas, y quedan unidos por el segundo anillo de compensación, habiéndose marcado

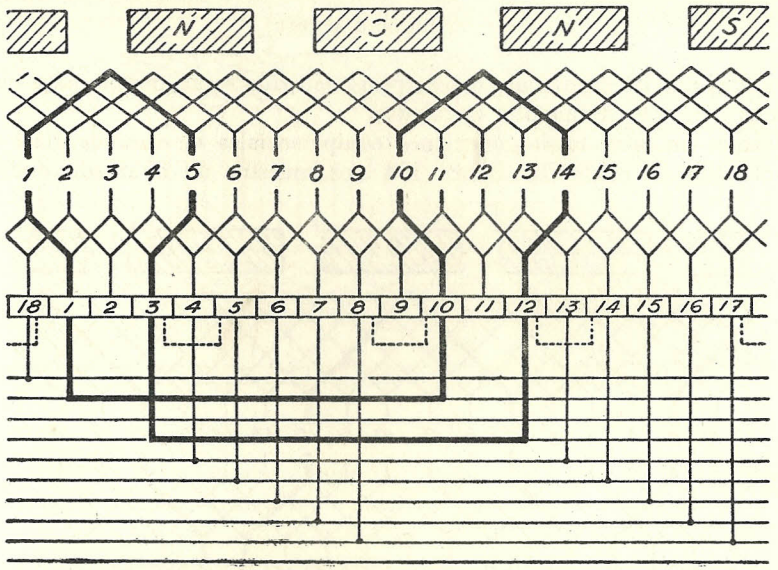

FIG. 195. — Conexión de compensación de 2ª clase en un bobinado imbricado doble.

más grueso el puente entre esos lados de bobina. Así se procede con los otros anillos de compensación.

También es posible realizar simultáneamente las conexiones de compensación de primera y de segunda clase en los bobinados imbricados múltiples. Un ejemplo de ello lo vemos en la figura 196. Tenemos aquí una máquina tetrapolar, con 20 ranuras en el rotor. Se han trazado más gruesas las conexiones equipotenciales que unen los puentes de ambas cabeceras. Las dos ramas iguales del bobinado doble se distinguen perfectamente siguiendo el trazado a partir de cualquier delga del colector.

Los anillos de compensación de primera clase se realizan en ambas cabeceras, y las de segunda clase se pasan entre la masa del rotor y su eje. En la figura, las de segunda clase son las que aparecen en sentido vertical a la izquierda.

Del mismo modo se procedería con otros tipos de trazados múltiples, buscando siempre puntos sincrónicos del devanado, y uniendo entre sí por una segunda serie de puentes las ramas que componen el bobinado.

CONEXIONES EQUIPOTENCIALES DE TERCERA CLASE

En los bobinados en anillo siempre hay una sola espira en contacto con cada escobilla, mientras que en los rotores con devanado en tambor ocurre que hay más de una bobina conectada en cada instante a cada escobilla.

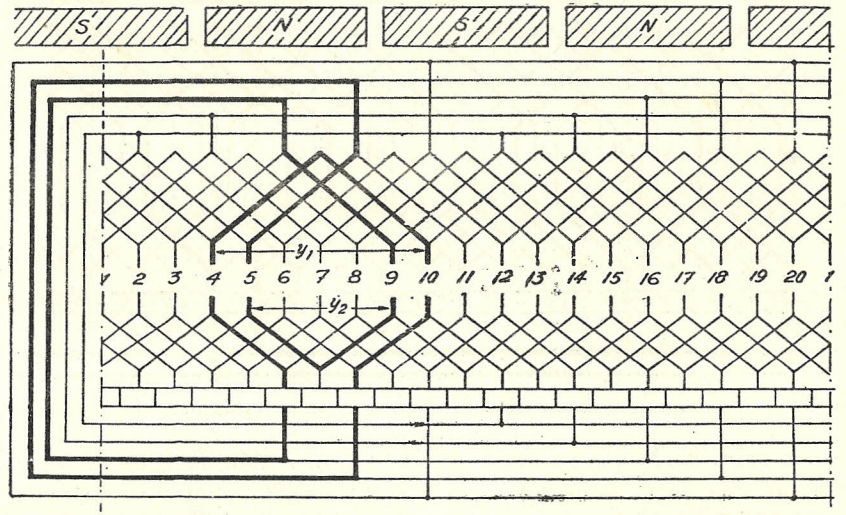

FIG. 196. — Conexiones equipotenciales de 1ª y 2ª clase en un bobinado doble múltiple.

En los bobinados múltiples esto se magnifica por tener escobillas de mayor ancho, ya que deben abarcar más de una delga. Habrá por lo menos, en cada momento, dos bobinas puestas en paralelo por la escobilla, y esas bobinas no están exactamente al mismo potencial instantáneo, de manera que se establecen corrientes parásitas entre ambas.

Para subsanar este inconveniente se han ideado conexiones equipotenciales de tercera clase, que unen puntos del bobinado que están en extremos opuestos del rotor, y entonces deben ser pasadas entre la masa del rotor y el eje, por orificios especiales.

Veamos como primer ejemplo, las conexiones equipotenciales de tercera clase en un bobinado imbricado de una capa, mostrado en la figura 197. Las líneas punteadas verticales son las conexiones equipotenciales de tercera clase que hemos mencionado. Aparecen además marcados en la figura anillos de compensación de las otras clases, en número de dos solamente, para no complicar el dibujo.

Los cables con que se realizan las conexiones de tercera clase no conducen corrientes fuertes, por lo que pueden ser de sección menor que los del bobinado. No ocurre lo mismo con las conexiones de primera y segunda clase, en las

que los cables deben ser por lo menos tan gruesos como los del bobinado mismo.

El ejemplo de la figura 197 trata un bobinado de una capa con un solo lado de bobina por ranura. También se pueden hacer conexiones de tercera clase cuando hay más de un lado de bobina por ranura, siempre en bobinados

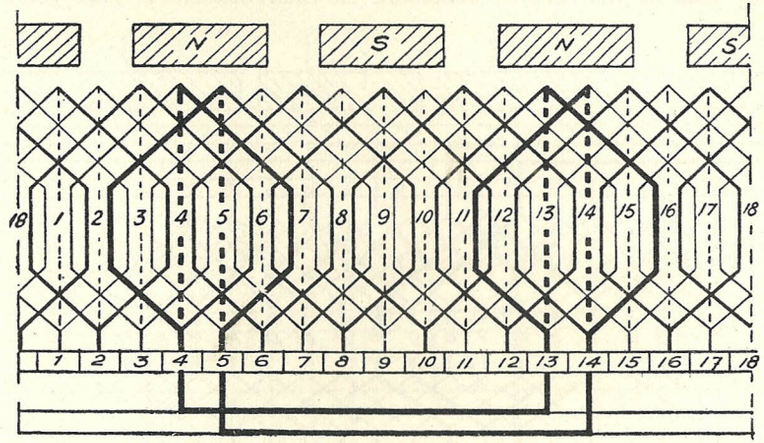

FIG. 197. — Conexiones equipotenciales de 3ª clase en un bobinado imbricado de una capa.

de una capa. Es lo que podemos ver en la figura 198. Se trata de un bobinado de una capa, imbricado, del tipo escalonado, para una máquina de cuatro polos. Recuérdese que los pasos de ranuras eran diferentes en este tipo de bobinados. Como antes, se han dibujado las conexiones equipotenciales de tercera clase con líneas punteadas verticales, cuatro de ellas más gruesas para que se noten en forma destacada.

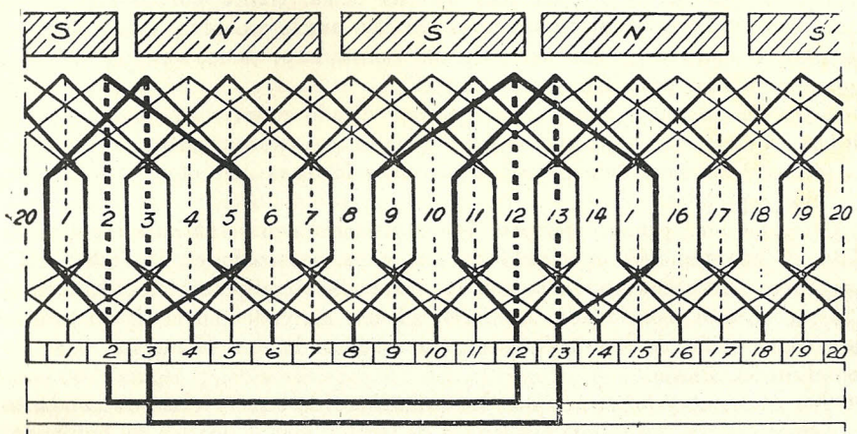

FIG. 198. — Conexiones equipotenciales de 3ª clase en un bobinado imbricado tipo escalonado.

CAPÍTULO XVI

CÁLCULO DE BOBINADOS Y REBOBINAJES

En los capítulos anteriores se ha visto la forma de diseñar y trazar los devanados de los inducidos de las máquinas eléctricas de corriente continua. En todos los casos se ha tenido en cuenta el tipo de máquina, el número de polos, el de ramas en paralelo, etcétera. Pero no se ha especificado la cantidad de conductores o de espiras que llevaba cada bobina. Esta cuestión pertenece a la fábrica de las máquinas, aunque muchas veces hay que encarar el problema del cálculo o apreciación de esas espiras.

En efecto, cuando se deba rebobinar un rotor, sea por destrucción del devanado que tenía, por cambio de características o por otras razones, hay que colocar nuevas bobinas en las ranuras, y cada bobina está formada por una cierta cantidad de espiras, según hemos dicho muchas veces.

Y allí está el problema nuevo con respecto a los bobinados, porque si bien el trazado se conoce perfectamente, hay que saber construir cada bobina. Hay infinidad de casos particulares, puesto que a veces se tiene parte del bobinado viejo y pueden contarse las espiras que tenía, lo que permitirá calcular la nueva cantidad que deba llevar. Otras veces no queda nada del bobinado anterior, pero en el colector se encuentran aún vestigios, como ser puntas de alambre, o los agujeros en los que estaban soldados los terminales, o cualquier otro indicio que permita encontrar o determinar el diámetro del alambre que había. Cuando se tiene el diámetro del alambre se puede tomar un trozo del mismo y colocarlo dentro de una ranura; si se colocan tantos trozos como sea necesario para llenar la ranura, la cantidad de ellos da el número de conductores que tenía una ranura, y se ve en seguida cuántas espiras debe tener o se puede calcular la cantidad que llevará el nuevo devanado.

A fin de dejar sentado cómo se procede para hacer cálculos de devanados, daremos varios ejemplos, que servirán de ilustración, y que permitirán resolver casos similares por comparación. Tales son los casos de bobinados nuevos, de rebobinajes por cambio de tensión o de velocidad, etcétera.

CÁLCULO DEL DEVANADO DEL ROTOR

Consideraremos en primer término el caso del cálculo de un devanado nuevo, como si se tuviera un rotor ranurado pero sin saber nada respecto a las espiras que deba llevar. Éste no es el caso más común, pues lo general es que se tenga todo o parte del devanado original de fábrica, pero el ejemplo resultará muy ilustrativo.

Por de pronto, las dimensiones de un polo, en la parte más cercana al rotor, que se indican con l: arco polar y b: ancho de polo, en la figura 199,

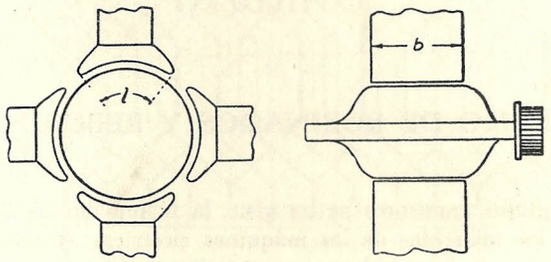

FIG. 199. — Indicación de la longitud del arco polar, y del ancho o espesor del polo.

son las que deben medirse en la máquina para poder entrar en los cálculos. Las dos medidas se toman en centímetros.

Además de esos datos, hacen falta otros, que detallamos a continuación, y que damos en columna, para ordenar el proceso de cálculo:

l..... arco polar (cm).
b..... ancho de un polo (cm).
E..... f.e.m. de la máquina o tensión en vacío (Volt).
N..... número de ranuras del rotor.
B..... inducción normal en el entrehierro (Gauss)
p..... número de polos.
a..... número de ramas en paralelo del bobinado.
z..... número total de conductores en la periferia del rotor, o sea igual al producto del número de ranuras por el de conductores de cada una.
n..... velocidad de giro del rotor (r.p,m.).

Con los datos señalados se puede calcular z, cantidad total de conductores, aunque lo que se busca en realidad es el número de espiras que tiene cada bobina, pero que es fácil de deducir conociendo z y el número de bobinas.

El número total de conductores activos en la periferia, se calcula con la expresión:

$$z = \frac{60\ a\ E\ 10^8}{B\ l\ b\ n\ p}$$

Debiéndose hacer algunas aclaraciones para poder usar la fórmula. En efecto,

la tensión en vacío E, no es la normal de la máquina, sino que es más o menos un 10 a un 20 % mayor en los generadores y un 10 % menor en los motores. Así, para generadores de 220 Volt de tensión normal, hay que tomar como valor de la f. e. m. E unos 240 a 250 V. Y si se trata de un motor para 220 Volt, se tomará para E un valor de 200 aproximadamente. Y ello porque hay que sumar o restar las caídas de tensión que se producen en generadores o motores, respectivamente, según se estudió en los primeros capítulos.

La inducción B en el entrehierro es una cifra más o menos uniforme para los tipos corrientes de máquinas. En la práctica depende de la potencia, según el cuadro siguiente:

Potencia en Kw....	0,5 — 5	1 — 5,	5 — 10	10 — 100
Inducción B.....	5000	6000	7000	7500

De modo que se adoptará el valor que corresponda según la potencia de la máquina. Se ve que para máquinas grandes se limita el valor a unas 7500 líneas por cm².

El número de ramas en paralelo del bobinado, *a*, depende del tipo, pues en los imbricados es igual al número de polos, en los ondulados es siempre 2, y en los múltiples y serie-paralelo, vale 2*n*, siendo *n* un número que da el aumento de cantidad de ramas en paralelo, según se estudió en capítulos anteriores. No debe confundirse esta letra *n* con n, velocidad de giro.

Cantidad de cobre a emplear

Una vez conocido el número de conductores activos y el tipo de devanado, y disponiendo del rotor para medir el largo de cada espira, se puede fácilmente calcular la cantidad y peso de alambre que necesita todo el devanado. En efecto, si observamos la figura 200, se ve que la longitud de una espira la indicamos con L, tomada en centímetros directamente sobre el rotor.

Luego, si z es el número de conductores activos calculado antes, es sabido que la cantidad de espiras será la mitad de z, pues cada espira está formada por dos lados. Si llamamos s a la sección del alambre de cobre, en mm², el peso de cobre necesario se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \frac{4{,}5\ L\ z\ s}{100.000}$$

Donde L se toma en cm (ver fig. 200), s en mm² y el peso P resulta en Kg.

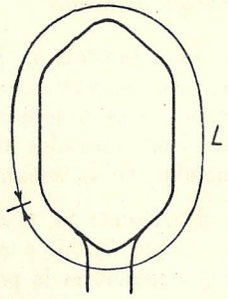

FIG. 200. — Indicación de la longitud de una espira del bobinado del inducido.

Sección del alambre

La sección del conductor para el bobinado depende de la corriente que conducirá, de modo que está ligado con la potencia y con el número de ramas en paralelo. Si llamamos I a la corriente total de la máquina, obtenida por cociente entre la potencia y la tensión en los bornes:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{\text{(Potencia en Watt)}}{\text{(tensión normal)}} = [\text{Amper}]$$

Se puede decir que la corriente en los conductores del bobinado será igual a:

$$i = \frac{I}{a}$$

Donde a es el número de ramas en paralelo, según ya sabemos. De modo que es fácil calcular la corriente en los alambres del rotor.

Ahora se debe adoptar una densidad de corriente, que para el caso del rotor puede ser mayor que en el estator, por la refrigeración que produce el rápido movimiento de giro de que está animado. En la práctica, la densidad de corriente para el bobinado del inducido oscila entre los límites:

$$d = 3 \text{ a } 6 \text{ A/mm}^2$$

Tomándose el valor menor para las máquinas más pequeñas y el mayor para las más grandes. De modo que si llamamos d a esa densidad de corriente, la sección del alambre vale:

$$s = \frac{i}{d} \qquad [\text{mm}^2]$$

Con lo cual se tiene la sección, necesaria para calcular el peso del cobre, pues se vió que necesitábamos este dato en la fórmula de aquél.

Ejemplo numérico

Para mostrar la forma de emplear las expresiones del cálculo, daremos un caso concreto, con valores numéricos, y esto servirá de modelo para los demás casos prácticos. Supongamos que se trate de proyectar un devanado para un generador de corriente continua con las siguientes características, tomadas de la máquina misma:

POTENCIA: Si se da en caballos vapor, se la reduce a KW multiplicando por 0,736, y a Watt multiplicando por 736. En la práctica, para generadores la potencia se da en KW y para motores en C.V. En nuestro caso es un generador de 5 KW.

TENSIÓN NORMAL: El valor de V, tensión normal es de 220 V. Luego la f.e.m. para los cálculos se tomará algo mayor. Supongamos que sabemos que E = 250 Volt.

VELOCIDAD: El número de revoluciones al minuto que da el rotor siempre es conocido, y en nuestro caso sea n:1200 r.p.m.

POLOS: Se trata de una máquina de 4 polos. La dimensión de la cara polar sobre el inducido se ha medido y resultó:

l = 24 cm
b = 15 cm (ver fig. 199).

ROTOR: Se trata de un rotor con 24 ranuras, de modo que N:24. Y debemos proyectar un devanado imbricado con cuatro ramas en paralelo, luego se tratará de un tipo simple.

Pasemos a encarar el cálculo. En primer lugar, adoptamos un valor para la inducción en la tabla anterior, de acuerdo con la potencia:

$$B = 6000 \text{ Gauss}$$

Con lo que podemos aplicar la fórmula general del número de conductores activos:

$$z = \frac{60 \times 4 \times 250 \times 100.000.000}{6000 \times 24 \times 15 \times 1200 \times 4} = 578$$

Con lo cual podemos calcular el número de espiras, puesto que sabemos que hay 24 ranuras y que cada ranura llevará, redondeando:

$$\frac{578}{24} = 24 \text{ conductores}$$

Y como se trata de un devanado simple, a doble capa, cada capa tiene 12 conductores, con lo que queda establecido que cada bobina tendrá 12 espiras. Luego, se harán:

24 bobinas iguales de 12 espiras c/u.

Veamos ahora la sección del alambre a emplear. Para ello supongamos que medimos la longitud de una espira según indica la figura 200, y que resultó:

$$L = 80 \text{ cm}$$

Además, calculamos la corriente total de la máquina, que siendo conocidas la potencia y la tensión normal, resulta:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{5000}{220} = 24 \text{ A}$$

Con lo que la corriente en los conductores resulta igual a I dividido por el número de ramas en paralelo:

$$i = \frac{I}{a} = \frac{24}{4} = 6 \text{ A}$$

Luego, adoptando una densidad de corriente de 3 A/mm², por tratarse de una máquina más bien pequeña, se tiene que la sección del alambre resulta:

$$s = \frac{i}{d} = \frac{6}{3} = 2 \text{ mm}^2$$

Y luego calculamos inmediatamente la cantidad de cobre a emplear, con la fórmula conocida:

$$P = \frac{4{,}5 \times 80 \times 578 \times 2}{100.000} = 4{,}15 \text{ Kg.}$$

La distribución del bobinado se hace en la forma que se ve en la figura 201, a doble capa, como corresponde. Cada bobina tiene 12 espiras, de modo que quedarán 3 capas de 4 espiras cada una en cada paquete. Las ranuras deben tener una dimensión mínima de 6 mm de ancho por 10 mm de fondo, y espacio auxiliar para alojar la aislación, cartón, etc.

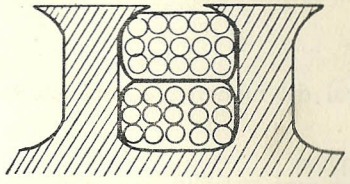

FIG. 201. — Distribución en corte de los conductores que forman el bobinado.

REBOBINAJES POR CAMBIO DE CARACTERÍSTICAS

Cuando se debe rebobinar una máquina de corriente continua, sea motor o generador, por haberse deteriorado el bobinado existente, no hay que hacer ningún cálculo, pues basta copiar el que tenía. Se trazará el devanado, se contarán los números de espiras por bobina, y se medirá el diámetro del alambre empleado. Es muy raro que el deterioro haya sido de tal magnitud que esos datos no puedan tomarse, de modo que interesan en esta oportunidad únicamente los rebobinajes por cambio de características.

Hay dos casos comunes de cambio de características de una máquina, y ellos son los originados por cambio de velocidad o de tensión. Un motor de 110 Volt que deba conectarse a 220 V.; un generador al que se acoplará un motor de impulso de distinta velocidad, etc., son las causas más frecuentes.

El cambio de características no siempre obliga a cambiar todo el bobinado, pues puede darse el caso que baste cambiar las conexiones al colector para que se cumpla con los requisitos prefijados. Así, por ejemplo, si se tiene un devanado ondulado de 4 polos, conectado a 220 Volt, y la máquina se debe usar en 110 V., se verá si se pueden cambiar las conexiones para pasar a imbricado, con lo que se duplica el número de ramas en paralelo, como es necesario, ya que en 110 V. la corriente total será doble, pero el número de conductores activos en serie puede reducirse a la mitad.

Y así en otros casos, hay a veces posibilidad de modificar un bobinado sin cambiarlo, y conectarlo en las nuevas condiciones de trabajo. Otras veces no

hay solución y hay que rebobinar. Daremos las normas principales para el rebobinaje, para los dos casos más comunes: cambio de velocidad y de tensión.

Cambio de velocidad de régimen

Llamaremos n a la velocidad de régimen del rotor, y n′ a la nueva velocidad que tendrá después de la modificación. Por simple planteo algebraico del problema se ve que el producto del número de espiras por la velocidad es constante, luego se tiene:

$$z' = \frac{z\,n}{n'}$$

Es decir que la nueva cantidad de conductores activos está dada por la anterior, z, multiplicada por la velocidad anterior y dividida por la nueva. El mismo cálculo se puede hacer con el número de espiras de cada bobina, cambiando las letras z por el significado correspondiente. Siempre las letras con apóstrofo son las correspondientes a la modificación.

Así, por ejemplo, si un motor que da unas 1200 r.p.m. debe cambiar esa velocidad por otra de 900 r.p.m., el número de espiras que tenía, que era 18, se debe cambiar por:

$$\frac{18 \times 1200}{900} = 24$$

Siendo 18 espiras las que tenía cada bobina y 24 espiras las que tendrá después de modificado.

Cambio de tensión de régimen

Cuando una máquina deberá trabajar a una tensión distinta, sea motor o generador, deben cambiarse los bobinados del inductor y del inducido, y a veces, también el colector y las escobillas. En todos los casos, hay una proporcionalidad entre cantidades de espiras, secciones de los alambres, etc., dada por la relación de las tensiones que había y la nueva. Si llamamos A a esa relación entre la tensión nueva E′ y la anterior E:

$$A = \frac{E'}{E}$$

Se cumplen las siguientes relaciones: Las intensidades de corriente en el inductor y en el inducido, a igual potencia y velocidad de la máquina, valen:

$$I' = \frac{I}{A}$$

Es decir que se cumple una relación inversa a la de las tensiones. Los números de espiras en el inductor y en el inducido están en la misma relación que las tensiones, es decir:

$$z' = A\,z$$

La cantidad de Ampervueltas en todos los bobinados se mantiene, es decir que no hay que emplear ningún coeficiente. Esto se deduce de las relaciones entre las corrientes y entre los números de espiras:

$$I'z' = \frac{I\,A\,z}{A} = I\,z$$

Es decir que por ejemplo, si en el inductor tendremos la mitad de la corriente, habrá doble número de espiras para no alterar el flujo magnético. Sin las relaciones anteriores, esto se hubiera deducido por simple lógica, pues el régimen magnético de la máquina no debe alterarse al cambiar la tensión en los bornes.

La sección de los conductores a emplear, para mantener la densidad de corriente en los mismos, se afecta del factor que corresponde, que es el mismo que afecta a la intensidad, pues una y otra cosa son proporcionales:

$$s' = \frac{s}{A}$$

Estas expresiones generales nos permitirán calcular cualquier rebobinaje por cambio de la tensión de régimen, por lo menos teóricamente. Veamos ahora algunas consideraciones prácticas especiales.

En los inductores debemos mantener el número de Ampervueltas, para lo que, si la tensión se hace, por ejemplo, cuatro veces menor, la intensidad de corriente y la sección de los almbres aumentan cuatro veces. Esto prácticamente parece inobjetable, pero los conductores más gruesos ocupan más lugar por haber mayores espacios vacíos y por no poder hacerse el bobinado tan apretado. En consecuencia, los bobinados inductores resultarán más voluminosos. Esto debe estudiarse bien para que no ocurra que al querer colocarlos no entren en el espacio disponible. Uno de los detalles que permite corregir el inconveniente es que al reducirse la tensión se puede usar menor aislación en los alambres, entre capas y entre bobinado y masa polar. Esas reducciones en general permitirán disponer el bobinado de modo que no resulte más grande que el primitivo.

Otro detalle de mucha importancia para el rebobinaje de inductores es que debe cuidarse que el número *exacto* de Ampervueltas no se altere, pues al variar el flujo de la máquina cambiaría la velocidad si se trata de un motor y la f.e.m. en un generador. Decimos esto porque al calcular la nueva sección, ocurrirá muchas veces que no hay exactamente en plaza cobre con la nueva calculada, y al poner una aproximada se altera la resistencia del bobinado con respecto a la cifra teórica resultante. En ese caso se debe corregir el número de espiras en la proporción adecuada para que la cantidad de Ampervueltas no se altere.

También hay que tener en cuenta, al hacer cambio de tensiones en una máquina, si el colector, con sus delgas y las escobillas soportan la modificación. En general, para valores de A no mayores de 2 no hay problema, pues las dimensiones de delgas y escobillas soportarán corrientes hasta dos veces mayores. Si A es menor que la unidad, por lógica, el problema no existe. Pero cuando aumenta mucho la corriente en los bobinados por reducirse la tensión

en cifras de, por ejemplo, cuatro veces, ocurrirá que las delgas y las escobillas tienen secciones insuficientes.

En esos casos hay que estudiar las soluciones. Por ejemplo, pueden colocarse escobillas más grandes, pero de modo que el aumento de dimensión sea en sentido axial porque si se aumenta el ancho abarcarían más delgas y se entorpecería el funcionamiento. También puede contemplarse el cambio de material de las escobillas.

Con respecto a las delgas del colector, si se sobrepasa la densidad de corriente hay que estudiar de reformar el bobinado, aumentando el número de ramas en paralelo. En realidad, no es la dimensión de la delga en sí lo que preocupa sino el chisporroteo por aumento de la corriente.

El caso inverso, es decir el de aumento de la tensión de régimen plantea otro problema. La tensión entre delgas de un bobinado está dada por la expresión:

$$E_d = \frac{V\,p}{K}$$

Es decir que esa tensión es igual a la tensión de régimen o entre bornes de la máquina, multiplicada por el número de polos y dividida por la cantidad de delgas del colector. Se especifica que la tensión entre delgas debe ser:

E_d menor que 25 Volt.

Si se supera esa cifra se produce un aumento del chisporroteo por una especie de arrastre de la chispa de conmutación. Si al calcular el rebobinaje ocurre que se supera la cifra límite, habrá que cambiar el diseño del bobinado, usando un colector con mayor número de delgas.

Ejemplo numérico

Sea el caso de rebobinar un motor de corriente continua, del cual extraemos los siguientes datos:

Motor: 3 C.V - 220 V. - 10 A. - 1500 r.p.m.

Inducido: bobinado imbricado p = 2; a = 2; 18 ranuras 36 delgadas 40 alambres de 1 mm por bobina.

Inductor: 2800 espiras alambre 0,4 mm.

Se debe rebobinar este motor para que a igual potencia y velocidad trabaje a la tensión de 440 Volt. Veamos los cálculos:

INDUCIDO:

El factor de cambio de tensión vale:

$$A = \frac{E'}{E} = \frac{440}{220} = 2$$

La intensidad de la corriente en los conductores del inducido es:

$$I' = \frac{I}{A} = \frac{10}{2} = 5 \text{ Amp.}$$

La nueva sección de cobre de los conductores de bobinado vale, si la primitiva, a razón de un diámetro de 1 mm tenía 0,785 mm²:

$$s' = \frac{s}{A} = \frac{0{,}785}{2} = 0{,}392 \text{ mm}^2$$

Que corresponde a un diámetro de conductor de 0,7 mm.
La cantidad de conductores o espiras por bobina será:

$$40\,A = 40 \times 2 = 80 \text{ espiras}$$

INDUCTOR:

La cantidad de espiras será ahora:

$$2800\,A = 2800 \times 2 = 5600 \text{ espiras}$$

Con alambre de una sección, siendo la primitiva la correspondiente a un diámetro de 0,4 mm, o sea 0,126 mm²:

$$s' = \frac{s}{A} = \frac{0{,}126}{2} = 0{,}063 \text{ mm}^2$$

Que corresponde a un diámetro de 0,284 mm. Como existe alambre de 0,286 mm (el N° 29 calibre ByS), es tan aproximado que no vale la pena corregir los resultados, pues la alteración no alcanza el 1 %.

COLECTOR:

La tensión entre delgas valdrá, después de la modificación:

$$E_d = \frac{V\,p}{K} = \frac{440 \times 2}{36} = 24 \text{ Volt}$$

Que por ser menor que 25 V. no creará ningún problema. Luego el cambio puede hacerse, sin modificar el trazado del bobinado.

PARTE CUARTA

BOBINADOS DE CORRIENTE ALTERNADA

BOBINADOS DEL ESTATOR — BOBINADOS TRIFÁSICOS EN CADENA — BOBINADOS TRIFÁSICOS IMBRICADOS O DE BOBINAS IGUALES — BOBINADOS TRIFÁSICOS ONDULADOS O DE BARRAS — BOBINADOS TRIFÁSICOS FRACCIONARIOS Y CON RANURAS VACÍAS — BOBINADOS DEL ROTOR — BOBINADOS DE MOTORES MONOFÁSICOS — BOBINADOS DE MOTORES UNIVERSALES — CÁLCULO DE BOBINADOS DE ALTERNA — CAMBIO DE TENSIONES, POLOS Y FASES — EJECUCIÓN Y REPARACIÓN DE BOBINADOS.

CAPITULO XVII

BOBINADO DEL ESTATOR

En las máquinas eléctricas de corriente alternada hay que distinguir, cuando se trata de sus devanados, si son monofásicas o trifásicas. Las de distinta cantidad de fases que las citadas, como las bifásicas, tetrafásicas y exafásicas son muy excepcionales y más bien de carácter experimental, por lo que no serán tratadas aquí.

Entre las de una y de tres fases, las segundas son más difundidas, pues rara vez se encuentra un generador monofásico, y los motores de este último tipo son únicamente de potencias muy reducidas, donde la diferencia de costo por unidad de potencia no es un factor de consideración.

Por las razones precedentes, trataremos con detención los bobinados para máquinas trifásicas, en primer término, dejando para más adelante los monofásicos, de los que supondremos que sólo hay motores. Entre las primeras, habrá que distinguir cuando se trata de generadores o de motores, aunque, como veremos, en lo que respecta al devanado del estator las diferencias son de carácter constructivo y no teórico.

Para comenzar el estudio del trazado de un devanado, hay que considerar previamente una serie de factores característicos, que son los que determinan el tipo de arrollamiento a ejecutar, dando los pasos, la cantidad de ranuras, y la posibilidad de realización.

Factores característicos

El primer detalle a ser tenido en cuenta en una máquina de corriente alternada, sea ella un motor o un generador, es la velocidad de giro, pues de tal magnitud dependen casi todos los demás factores. En los generadores, la velocidad depende de la que tenga la máquina propulsora, pues casi siempre los ejes de ambas máquinas se acoplan directamente. En los motores, habrá que

considerar la velocidad necesaria para impulsar la máquina o dispositivo a que está destinado, cosa siempre conocida. Resumiendo:

Velocidad.

Es el número de revoluciones por minuto que da el rotor de la máquina, se designa con la letra n, e interviene en todos los cálculos referentes a bobinados. Se toma en vueltas por minuto, porque así están tarados los taquímetros, aparatos que permiten conocer, por lectura directa, la velocidad de giro; para ello basta aplicar a la punta del eje de la máquina, el del taquímetro, leyendo en la escala del mismo la cantidad de giros al minuto (r.p.m.).

Número de polos.

En las máquinas de corriente continua, el número de polos era poco más o menos que arbitrario, eligiéndoselo lo mayor posible para aumentar el aprovechamiento del núcleo del rotor y para disminuir la longitud de las conexiones frontales. Fuera de las consideraciones de carácter práctico, no había inconveniente en elegir un número de polos grande o pequeño.

En las máquinas de corriente alternada, en cambio, el número de polos depende directamente de dos factores que no son arbitrarios, por lo que no se podrá tomar un número cualquiera o atender a razones de índole más o menos práctica. Estos dos factores son: la velocidad de giro, definida más arriba, y la frecuencia de la corriente alternada de la red.

El número de polos está dado por la expresión:

$$p = \frac{120\,f}{n}$$

en la que f es la frecuencia, casi siempre igual a 50 en nuestro país; n es el número de revoluciones por minuto y p el de polos. Poniendo f = 50 se simplifica la fórmula en:

$$p = \frac{6000}{n}$$

Debe recalcarse que las velocidades dadas por la expresión anterior son las llamadas "sincrónicas" y corresponden a las máquinas de esta denominación. Para motores asincrónicos o "de inducción" son algo menores, pero para el diseño del bobinado se las toma con sus valores sincrónicos, pues el campo magnético de los mismos gira con velocidad sincrónica alrededor del eje (ver capítulo VI).

Número de ranuras.

El núcleo del estator tiene, en su periferia, una serie de ranuras para alojar los conductores del bobinado. El número de ellas debe estar de acuerdo con el bobinado a colocar, si se desea ocuparlas totalmente, como es usual. Pese a esto, hay devanados que no ocupan todas las ranuras del estator, precisamente porque no se cumple la condición citada, como es el caso de rebobinajes de motores para distintas velocidades, caso que veremos más adelante.

Número de ranuras por polo y fase.

Esta cantidad caracteriza al bobinado, y en la práctica toma valores muy dispares, pero para motores asincrónicos se las limita entre 2 y 8, para los del tipo distribuído. Como debe ser una cantidad entera, debe cumplirse una condición para poder realizar el devanado, que dice que el cociente del número total de ranuras dividido por el de polos y de fases debe dar un número entero, y precisamente la cantidad de ranuras por polo y fase, definida.

Lo dicho puede expresarse, matemáticamente, por la relación:

$$\frac{N}{3\,p} = \text{número entero}$$

siendo N el número total de ranuras del estator y p el de polos. El número 3 que figura en el denominador, corresponde a un devanado trifásico; si no lo fuera, se pondría en su lugar el número que corresponda a la cantidad de fases.

El resultado de la relación anterior es el número de ranuras por polo y fase que tendrá la máquina. Si no da un número entero, no será posible realizar el bobinado con ocupación total de ranuras, y habrá que dejar algunas vacías, tantas como unidades haya que restarle a N para que la expresión dada resulte una cantidad entera y no fraccionaria.

Como el número de polos está ligado a la velocidad de la máquina, se puede confeccionar una tabla que dé por anticipado la solución de la relación anterior, para los casos más corrientes en la práctica. En efecto, los números de ranuras usuales son siempre pares, y en las aplicaciones corrientes varían entre 12 y 96. Cantidades menores no son prácticas y mayores no son muy frecuentes en motores industriales de potencias chicas y medianas.

La tabla siguiente da la posibilidad de realización de bobinados a ocupación total de ranuras para algunos casos comunes. Hacemos notar que estas consideraciones son previas a la descripción de sistemas de bobinados, pues estos últimos son independientes de lo que estamos tratando. Sólo se puede encarar el trazado del devanado cuando se conoce el número de ranuras a utilizar, y para conocerlo hay que saber si se pueden usar todas las que tiene el estator o no.

Si un estator disponible no está encuadrado dentro de las condiciones de la tabla, habrá que realizar el bobinado sin ocupar todas las ranuras, dejando vacías algunas en cantidad igual al excedente de las que tiene y el número inmediato sobre el de la tabla que reúna las condiciones. Así, por ejemplo, un motor cuyo estator tiene 42 ranuras con bobinado de dos polos, tiene ocupación total de las mismas; si se lo quiere rebobinar para cuatro polos, vemos en la tabla que no se puede, por lo que habrá qué dejar 6 ranuras vacías, distribuídas uniformemente en la periferia, porque con 36 solamente, se puede hacer tetrapolar.

Posibilidad de realización de bobinados trifásicos ocupando todas las ranuras del estator

Nº de ranuras	p = 2 n = 3000	4 1500	6 1000	8 750	10 600	12 500
12	si	si	no	no	no	no
18	si	no	si	no	no	no
24	si	si	no	si	no	no
30	si	no	no	no	si	no
36	si	si	si	no	no	si
42	si	no	no	no	no	no
48	si	si	no	si	no	no
54	si	no	si	no	no	no
60	si	si	no	no	si	no
66	si	no	no	no	no	no
72	si	si	si	si	no	si
78	si	no	no	no	no	no
84	si	si	no	no	no	no
90	si	no	si	no	si	no

En forma similar se resolverán todos los casos que se presenten, algunos de los cuales serán aclarados en el capítulo correspondiente a bobinajes. La solución ideal es, lógicamente, la de ocupar todo el estator, si la máquina ha sido diseñada para ello, porque a veces, como en el caso de los motores monofásicos, se construyen con ocupación parcial de ranuras, porque no se obtiene beneficios con usar todas, como se verá en su oportunidad.

Tipos de bobinados

Los devanados del estator se pueden realizar en dos formas netamente distintas, que se denominan: concentrados y distribuídos. En los primeros, se coloca un solo conductor o haz de conductores en una ranura por polo y por fase; así, para una máquina bipolar trifásica habría sólo seis ranuras con tres bobinas. Esta práctica se ha dejado por la de efectuar los devanados distribuídos, en los que los conductores se reparten en varias ranuras por polo y por fase.

La razón es que en los concentrados se tenía un pésimo aprovechamiento de la periferia del estator, que resultaba de mayores dimensiones, para poder alojar en una ranura los conductores necesarios por polo y por fase. Además, la forma del campo magnético a lo largo del entrehierro no es sinusoidal y se generan armónicas que están presentes en la corriente de salida.

Como la ventaja del devanado concentrado es únicamente la de suministrar un poco mayor fuerza electromotriz inducida, no compensa el aumento de dimensiones de la máquina por las razones expuestas. La proporción de f.e.m. inducida en un devanado distribuído con respecto a uno concentrado se llama "factor de distribución", y su valor revela que no se justifica la ejecución de devanados concentrados.

En lo que sigue nos ocuparemos únicamente de los devanados distribuídos, que son los que se usan actualmente, y por lo tanto, los que se le presentarán al bobinador moderno. Los otros tipos quedan relegados a las concepciones teóricas, pues se prestan admirablemente para descripciones sencillas de la explicación del funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente alternada, como lo hemos hecho al principio del capítulo V

FORMAS DE EJECUCIÓN

Dentro de los bobinados distribuídos, hay varios sistemas de realizar el arrollamiento a lo largo de la periferia del estator. Las diferencias son de orden constructivo, y están determinadas por las cabezas de bobinas pues, como tienen que cruzarse, ello se puede hacer de varias formas distintas.

Distinguiremos entonces dos diferencias fundamentales en la ejecución, que se denominan bobinados en cadena y en doble capa. Cada uno tiene propiedades que lo distinguen:

Bobinado en cadena

También se lo llama de cabezas distintas porque las bobinas no son iguales entre sí, sino que las hay más cortas y más largas, para poder acomodar los

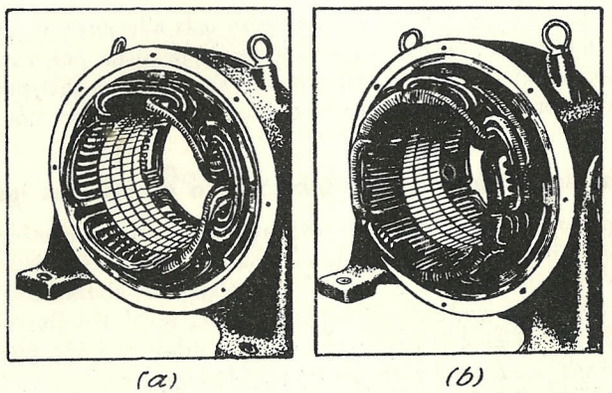

FIG. 202. — Aspecto de los bobinados en cadena: (a) cabezas en dos planos; (b) cabezas en tres planos.

cruces en las cabezas frontales. Dentro de los devanados en cadena, los hay de cabezas en dos rangos y en tres rangos, es decir, con bobinas de dos dimensiones solamente o de tres dimensiones distintas, respectivamente. Más adelante veremos la forma de ejecución de cada uno de ellos. La figura 202 muestra los dos tipos mencionados.

El reparto de conductores en la periferia del estator es muy regular, con lo que el factor de potencia y el rendimiento de la máquina resultan superiores

a los otros devanados que se verán en seguida. Las ranuras son de pequeñas dimensiones, pues alojan a un solo lado de bobina, con resultado de buer aprovechamiento del núcleo.

Las bobinas resultan de formas rectangulares, con sus cabezas con combas hacia afuera o hacia adentro, según el caso.

Se usan en todos los generadores que tienen devanados de bobinas (porque

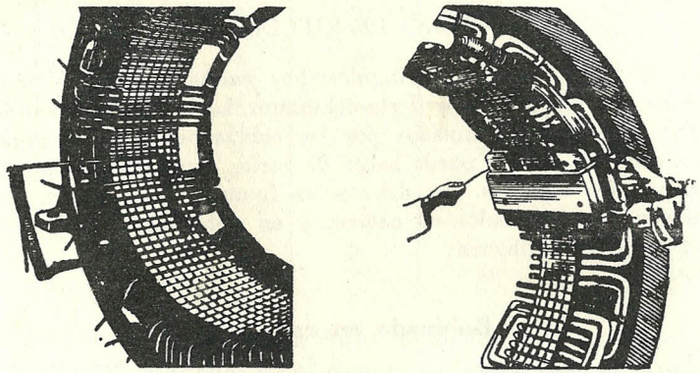

FIG. 203. — Forma de ejecutar un bobinado en cadena con cabezas en dos planos. Son dos tipos distintos para apreciar las variantes que se presentan.

hay, además, los tipos de barras, que se verán más adelante) y en los motores de potencia importante, usándose en motores de pequeña potencia cuando no se quiere contemplar el costo de fabricación. En la figura 203 puede verse la forma de ejecución de un bobinado en cadena con cabezas en dos planos.

Bobinado en doble capa, imbricado o de bobinas iguales

Tiene aspecto que recuerda a los devanados de corriente continua, por cuya razón reciben el nombre de imbricados. Todas las bobinas son iguales entre sí, lo que habla de la posibilidad de hacerlas en plantillas, abaratando la mano de obra de ejecución. La cantidad de bobinas resulta igual al número de ranuras y la forma de las mismas es trapezoidal o romboidal. Además, pueden hacerse en una sola capa, siempre dentro del tipo de bobinas iguales, si el número de ranuras lo permite. La figura 204 nos muestra un bobinado imbricado terminado para una máquina de 4 polos; corresponde a un bobinado hecho en molde. En la figura 205 podemos ver otro bobinado imbricado pero hecho a mano.

Estos devanados resultan mejor ventilados que los anteriores, por lo que se puede llegar a densidades algo mayores de 4 Amper/mm^2, aprovechando mejor el cobre. Además, resultan de un costo muy inferior de mano de obra, que los hace ideales para fabricación en serie y a bajo costo.

Frente a esto, tenemos su rendimiento y factor de potencia algo menores que en los motores con devanados en cadena, pero esto no es óbice para que

se haya adoptado tal tipo de construcción en los motores modernos de potencias no muy grandes. ¡Esto se justifica pensando que se puede realizar un bobinado completo en la cuarta parte de tiempo!

El núcleo de hierro, en cambio, debe tener mayores dimensiones, porque

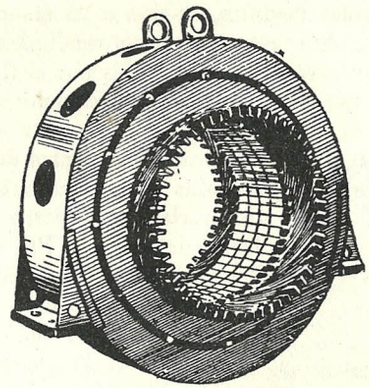

FIG. 204. — Aspecto de un bobinado imbricado para un alternador de 4 polos.

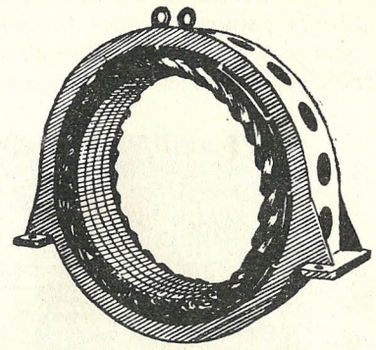

FIG. 205. — Aspecto de un bobinado imbricado hecho a mano para un alternador trifásico.

necesita ranuras de mayor profundidad que en el caso de los tipo "cadena" o "bobinados a mano", como también se lo denomina en contraposición con los bobinados "en plantilla" (tipo doble capa).

Bobinados de barras

Se utiliza en los estatores de bajas tensiones o en rotores de los motores asincrónicos. En lugar de tener bobinas formadas por varias vueltas de alambre conductor, tienen una barra única en cada ranura, haciéndose las conexiones frontales mediante trozos de barras de cobre alabeadas en forma conveniente. La figura 206 nos deja ver este tipo de bobinado de barras en el estator.

Los tipos de barra única se utilizan para estatores y los de barra doble, para rotores. En la oportunidad correspondiente volveremos sobre esto.

Por oposición en la denominación, todos los bobinados descriptos hasta aquí se llaman: "de bobinas" para diferenciar los de barras, pues en los primeros cada bobina tiene un haz de conductores, mientras que en los últimos, uno solo.

Generalmente el bobinado de barras se hace como el tipo ondulado de corriente continua, es decir, con avances progresivos a lo largo del mismo, cumpliendo en muchos casos, varias veces el paso polar antes de conectarse nuevamente. En el capítulo XX volveremos sobre ellos.

Resumen comparativo entre los diversos tipos

Tenemos entonces, dos tipos fundamentales de devanados, concentrados y distribuídos, de los cuales se utiliza generalmente el segundo. Entre los devanados distribuídos, encontramos los de bobinas distintas, cadena o "a mano", utilizado para generadores de tensiones altas, para motores de gran rendimiento y aun para pequeños, en los que se está substituyendo cada vez más por el tipo doble capa, imbricado o de plantillas, que tiene ventajas de aprovechamiento del cobre y de costo de mano de obra, contra desventajas en el rendimiento, núcleos de hierro y factor de potencia. Por tales motivos, se usa el último nombrado, cuando el factor costo tiene importancia mayor que la pequeña diferencia en el rendimiento, y ello es para motores de potencias no muy grandes.

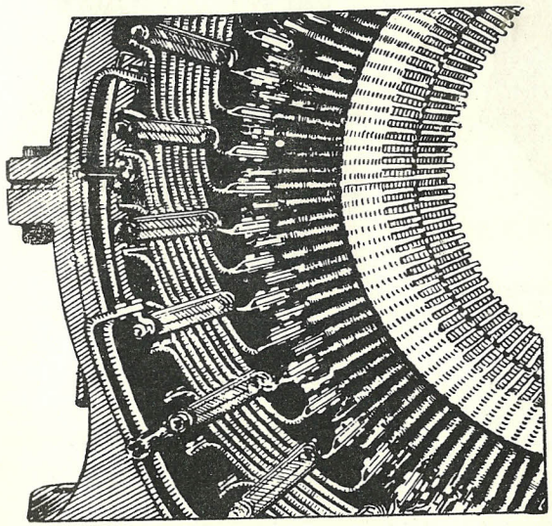

FIG. 206. — Aspecto de un bobinado de barras para un alternador trifásico.

Fuera de los devanados "de bobinas" entre los que se encuentran los dos tipos descriptos más arriba tenemos los de barras, utilizados en generadores de bajas tensiones o en los rotores de los motores asincrónicos. En estos últimos se emplean porque la intensidad de corriente es siempre fuerte, con lo que se necesita una sección de cobre grande para el tamaño que se le puede dar a la ranura, optándose muchas veces por economizar aislación y emplear el bobinado en barras, pese a que, pasando de ciertas secciones, la densidad admisible comienza a disminuir y deja de resultar conveniente. Se emplea entonces el de alambres retorcidos, que es idéntico en el trazado al de barras, pero que tiene mayor superficie de irradiación por causa de la aislación, que es única para todo el haz de conductores.

Trataremos en el desarrollo siguiente los tipos descriptos, en forma detallada, para brindar al bobinador por lo menos un ejemplo de cada tipo y colaborar en la solución de los problemas particulares que se le puedan presentar.

CAPITULO XVIII

BOBINADOS TRIFÁSICOS EN CADENA

Están muy difundidos en alternadores y motores, y se construyen colocando un solo lado de bobina en cada ranura del estator. Está claro que cada lado de bobina está formado por un haz de conductores activos, porque sino se trataría del bobinado de barras, ya descripto como tipo aparte.

Los bobinados en cadena se construyen de forma que las cabezas de bobina están sobre una superficie de revolución, de naturaleza cónica, cilíndrica u otra más rara. Esto es debido a que las cabezas de bobina se cruzan entre sí, de modo que hay que desviarlas para dejar paso a las de mayor longitud.

En general se agrupan estos devanados, según la forma y posición relativa de las cabezas de bobinas, en dos tipos diferentes: con cabezas en dos planos y en tres planos. La figura 202 muestra el aspecto de un extremo del bobinado de cada uno de los dos tipos mencionados. Obsérvese la superposición y los pliegues que se han debido hacer para evitar que las cabezas queden en un solo plano, lo que sería imposible con este tipo de devanado.

En la práctica se utiliza casi siempre el bobinado en tres planos, para máquinas de dos polos, es decir, para 3000 r.p.m. de velocidad sincrónica, y el de dos planos para las multipolares. Esto se debe a que el bipolar debe hacerse en tres planos por razones constructivas, mientras que los de mayor número de polos pueden hacerse en dos o en tres planos, eligiéndose el de dos para reducir la longitud de las bobinas y con ello el costo del devanado y aun del motor mismo.

Hacemos presente que al hablar de bipolar, multipolar, etcétera, refiriéndose a los devanados del estator de máquinas de corriente alternada, no siempre se puede ver inmediatamente ello en las mismas, como en el caso de corriente continua, pues si bien los alternadores y motores sincrónicos tienen rotor con polos salientes, que permiten comprobar la coincidencia del devanado del estator con los polos del rotor, en los motores asincrónicos, que son los más generalizados, ello no se ve tan fácilmente, siendo más bien

de carácter subjetivo. Para evitar confusiones, conviene desarrollar el bobinado estatórico sin pensar en el rotor de la máquina, hasta que se presente el problema de bobinar el rotor mismo, y entonces establecer las relaciones que debe haber con el estator. Esto es posible, porque el número de polos de la máquina es un dato invariable en cuanto se conoce la velocidad de giro, y habrá que acomodar al rotor a ese número de polos.

Como de costumbre, para diseñar el bobinado deberá establecerse con exactitud el "paso", para conectar entre sí los lados de bobina; los puentes, para hacer las conexiones frontales de unión entre bobinas y las entradas y salidas de corriente, y la forma de conectarlas entre sí y con la red, para conectar todo el devanado.

Paso del bobinado

Definiremos previamente lo que se entiende por "paso polar". Es la cantidad de ranuras que corresponde al cociente entre el total de ellas y la cantidad de polos. Así, si un estator tiene 36 ranuras y cuatro polos, el paso polar es igual a:

$$\text{paso polar} = \frac{36}{4} = 9$$

El paso del bobinado en los del tipo en cadena, si fueran concentrados, sería igual al paso polar, pero como son distribuídos, sólo una o ninguna

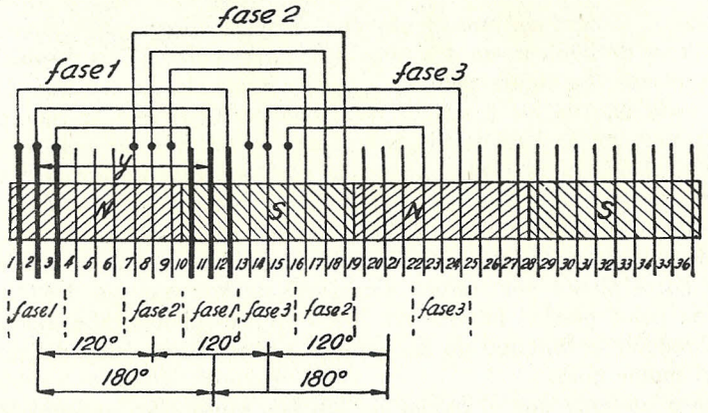

FIG. 207. — Principio de ejecución de un bobinado en cadena.

bobina tiene exactamente el paso polar, y se considera entonces el paso medio del bobinado, que es precisamente el paso polar.

Para aclarar lo dicho, veamos la figura 207. Se han considerado 36 ranuras y cuatro polos, pero no variará mucho el problema si hay distinta

cantidad de ellas o de polos, salvo que no se pueda realizar el bobinado a ocupación total de ranuras para lo cual debe consultarse previamente la tabla del capítulo anterior.

El paso polar es igual a 9, y la cantidad de ranuras por polos y fase es:

$$\frac{36}{3 \times 4} = 3$$

de modo que las nueve ranuras de cada polo serán agrupadas de tres en tres, correspondiendo tres para cada fase, y así en los demás polos, es decir, debajo de los restantes polos imaginarios que hemos dibujado en la figura.

Como el paso de devanado es igual a 9, en término medio, se toma la bobina media de las tres que corresponden a la fase 1 y se cumple con ella el paso medio de 9, es decir, que se unirá al lado de bobina que está en la ranura 11, pues se partió de la Nº 2. La ranura 1 se une con la 12 y la 3 con la 10, con lo que los pasos han resultado de 11 para el lado de bobina Nº 1; de 9 para el Nº 2 y de 7 para el Nº 3. En la figura hemos indicado con "y" al paso medio o polar.

Se podría unir el lado Nº 1 con el Nº 10 y el Nº 3 con el Nº 12, con lo que se tendrían pasos iguales para las tres bobinas, pero habría que cruzar entre sí las tres cabezas de bobinas, con gran complicación constructiva y sin beneficios, porque, como se verá, hay bobinados que se diseñan especialmente para no cumplir el paso polar, como los de paso corto y paso largo, con el objeto de uniformar la inducción en el entrehierro y mejorar la forma de onda de la corriente inducida.

Tenemos así conectadas tres bobinas de la fase 1 (por arriba solamente, pero la parte inferior es idéntica), es decir, lo que se llama un grupo de bobinas. Debemos pasar ahora a las otras dos fases, para lo cual debemos hablar de *paso de fase*.

Paso de fase

Las tres fases de un devanado trifásico deben estar desplazadas entre sí en el estator, de un ángulo fijo igual al defasaje natural entre los tres vectores del sistema eléctrico que forma. Este defasaje es de 120° eléctricos, es decir, la tercera parte de un ciclo de la corriente alternada, pues éste tiene 360° eléctricos.

En una máquina bipolar, para el devanado distribuído en la periferia del estator, se cumple que durante una vuelta completa del campo, la corriente inducida ha completado un ciclo, exactamente, de manera que los desplazamientos geométricos coinciden con los defasajes eléctricos. Con esto se puede afirmar que basta separar las tres fases de una tercera parte del desarrollo total del estator, para tener los defasajes eléctricos de 120°.

En nuestro caso se hubiera corrido la fase 2 de un tercio del total de ranuras, es decir, de 12 ranuras para el caso de la figura 207, con lo que la fase 2 comenzaría en la ranura 13 y la 3 en la ranura 25. Pero como se trata de cuatro polos, esto no se puede hacer.

En máquinas multipolares, durante una vuelta del campo magnético se cumple más de un ciclo de la corriente inducida, pues en la de cuatro polos, por ejemplo, al dar una vuelta al rotor, se tienen dos ciclos completos; en la de seis, tres completos, etcétera, y en general, en máquinas de p polos, la cantidad de ciclos por vuelta será

$$\tfrac{1}{2}\ p$$

es decir, la mitad del número de polos, con lo que los grados eléctricos serán iguales a los grados geométricos multiplicados por ½ p, es decir,

$$\text{grados eléctricos} = \tfrac{1}{2}\ p \times \text{grados geométricos.}$$

En el devanado de la figura 207, ½ p vale 2, con lo que los grados eléctricos son precisamente la mitad de los geométricos, es decir, que se tomará la mitad de la distancia que correspondía a una máquina bipolar. En lugar de 12 ranuras como paso de fase, se toman 6. Así, si la fase 1 comienza en la ranura 1, la 2 comienza en la 7 y la 3 en la 13, como se ve en la figura.

Si se tratara de una máquina de seis polos, se tomaría la tercera parte de 12 ranuras; y en esta forma, seguiríase aplicando el criterio que emana de las frases explicadas más arriba.

Si el número total de ranuras es N, el paso de fase es igual a:

$$\text{paso de fase} = \frac{2\,N}{3\,p}$$

que permite calcular el número de ranuras que separan entre sí las bobinas de cada fase, para máquinas de cualquier número de ranuras y polos.

Aplicando la fórmula anterior al caso de la figura 207, con 36 ranuras y 4 polos, se tiene:

$$\text{paso de fase} = \frac{2 \times 36}{3 \times 4} = \frac{72}{12} = 6$$

que era precisamente lo que se había dicho.

Siguiendo con el ejemplo, se tomarán las tres ranuras 7, 8 y 9 para la fase 2, y se unirán con las que distan de ellas una cantidad de ranuras igual al paso polar en término medio, es decir, con las números 16, 17 y 18, en la forma como se ve en la figura 207. En manera análoga se encuentra el trazado de los grupos correspondientes a la fase 3 y los que faltan de las fases 1 y 2.

En la misma figura se han marcado los defasajes eléctricos que corresponden a media vuelta del estator, y las distancias polares eléctricas, porque las geométricas son de 90° para las máquinas de cuatro polos.

EJEMPLOS DE BOBINADOS EN CADENA

Con la observación de la figura 207, y lo dicho hasta aquí, se pueden encarar algunos ejemplos de bobinados en cadena, con cabezas en dos o en tres planos. Para simplificar los dibujos y facilitar al lector la tarea de seguir el devanado, elegiremos números de ranuras reducidos, con lo que también lo será el número de ranuras por fase y por polo, de modo que los rectángulos concéntricos que se comenzaron a trazar en la figura 207 serán pocos para cada par de polos, a lo sumo 2. En la práctica suele haber más de 2, pero no tendrá el bobinador ninguna dificultad en aumentar uno, dos o más rectángulos alrededor de los que ya aparecerán en las figuras, continuando con los puentes marcados entre los dos que existen.

Bobinado de dos polos con cabezas en tres planos

Supongamos un estator de 24 ranuras en el que se quiere realizar un devanado de 2 polos, para velocidad sincrónica de 3000 r.p.m. La figura 208 da la solución, que describiremos paso a paso.

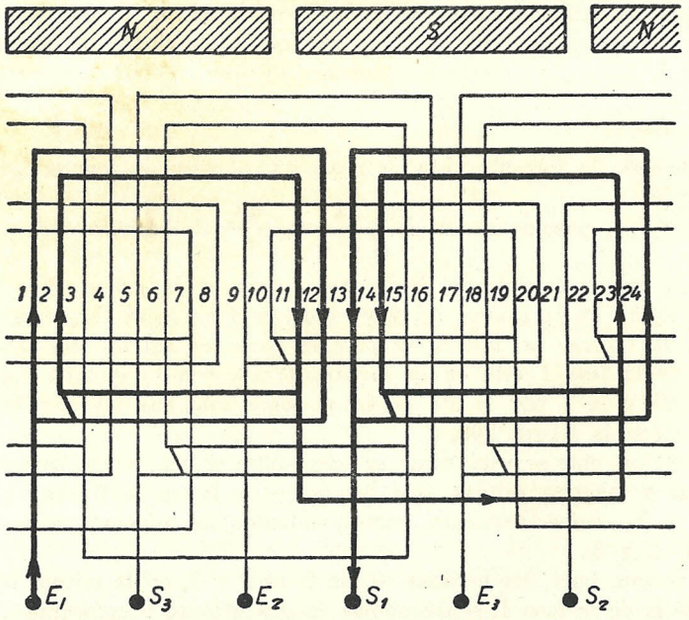

FIG. 208. — Bobinado de dos polos con cabezas en tres planos.

Se comienza por marcar los 24 lados de bobina o ranuras, que es lo mismo, y se numeran; se calculan los valores característicos del bobinado, de los que se habló en el capítulo anterior.

Ranuras por polo y fase.

Como se trata de 24 ranuras, con dos polos y bobinado trifásico, pues no trataremos otros en este capítulo, el número pedido es:

$$\frac{24}{2 \times 3} = 4 \text{ ranuras por polo y fase}$$

Tomaremos las números 1, 2, 23 y 24 para la fase 1 polo Norte, y las 11, 12, 13 y 14 para la misma fase, polo Sud, puesto que deben estar distanciadas del paso la dos series de ranuras.

Paso polar.

Es el cociente entre el número de ranuras y de polos, es decir:

$$\text{paso polar} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$$

que justifica la distancia que hemos tomado entre los dos grupos de ranuras correspondientes a la fase 1, por ejemplo. Podríamos hacer cuatro rectángulos concéntricos que representarían las cuatro bobinas de la fase 1, pero resultarían muy largas las dos exteriores, por lo que repartimos la mitad para cada lado, uniendo la 1 con la 12, la 2 con la 10, la 13 con la 24 y la 14 con la 23, quedando terminada la sección de bobinado correspondiente a la fase 1.

Paso de fase.

Aplicando la fórmula vista, se tiene que el paso de fase es igual a:

$$\text{paso de fase} = \frac{2 \times 24}{3 \times 2} = \frac{48}{6} = 8 \text{ ranuras}$$

es decir, que si la entrada de la fase 1 está en la ranura Nº 1, la de la fase 2 estará en la ranura Nº 9 y la de la 3 en la Nº 17, como se puede ver en la figura. Lo mismo se cumple para las salidas del devanado: la salida de la fase 1 está en la ranura Nº 13, con lo que la fase 2 saldrá por la 21 y la 3 por la 29, es decir, como sólo hay 24, por la Nº 5, de acuerdo con la figura 208.

Posteriormente se verá cómo se unen entre sí y a la red trifásica las tres entradas y las tres salidas, que hemos marcado en la figura: E_1, E_2, E_3, S_1, S_2 y S_3, respectivamente, correspondiendo los números inferiores a las fases 1, 2 y 3.

Se trazan, pues, las bobinas de las fases 2 y 3, en la misma forma como se trazó la de la fase 1, separándolas en dos grupos, y colocando las cabezas en tres planos, como se puede ver en la figura. Falta ahora unir los dos grupos de bobinas entre sí, de cada fase, pues las dos de cada grupo llevan un simple puente de conexión, marcado en la figura.

Para hacer los puentes correctamente, debemos hacer algunas consideraciones previas.

Conexiones frontales.

En un instante determinado, la corriente alternada tiene un sentido de circulación dado por reglas prácticas, y supondremos que tal sentido sea hacia arriba en los conductores alojados en ranuras debajo del polo Sud. Hemos marcado en la figura estos sentidos.

Para que haya continuidad de circulación, la conexión de los dos grupos de bobinas (de dos bobinas cada grupo, en este caso) debe hacerse de modo que la corriente no encuentre direcciones contrarias en su recorrido, de manera que entrando por el lado de bobina Nº 1, pasamos al 12, que queda debajo del otro polo, de aquí pasamos al Nº 2, por el puente interno, y de éste al Nº 11.

Del Nº 11 no podemos pasar, mediante la conexión frontal al Nº 13, porque los sentidos de corriente se encontrarían, por cuya razón hacemos la conexión con el lado Nº 23, para pasar de éste al 14, de ahí al 24, por el puente interno y del 24 al 13, por donde se va a la salida.

Estos sentidos de corriente duran medio ciclo de la corriente alternada, pero al invertirse, durante el otro medio, lo hacen simultáneamente en todos los conductores, de modo que no se alteran las condiciones de circulación, sino en el detalle que ella se cumple en sentido contrario. Para aclarar los sentidos de circulación conviene ver las consideraciones al final del ejemplo siguiente.

Similares consideraciones nos llevarían a hacer las conexiones frontales de las fases 2 y 3 entre los conductores (o haces conductores, mejor dicho) Nº 19 y 7 y entre los 3 y 15.

Con esto tenemos terminado el trazado de bobinado propuesto, que resulta en tres planos de cabezas por ser de dos polos, de modo que el aspecto terminado será similar al de la figura 202 parte (b), salvo en el detalle que el de la figura tiene mayor número de ranuras y de polos.

Los polos indicados en la parte superior de la figura 208, pueden no tener significación objetiva en la realidad, si se trata de un motor asincrónico, por ejemplo, pero se prestan bien a facilitar el trazado del bobinado, de modo que conviene dibujarlos. Insistiremos en el detalle de que cada bobina, marcada en la figura como si tuviera una sola espira, tiene en realidad un haz de espiras, todas concéntricas y envueltas en cinta para formar un paquete. Cada línea del dibujo representa pues, un paquete de conductores, salvo las conexiones frontales y los puentes internos, que son de un solo conductor.

Bobinado de cuatro polos con cabezas en dos planos

Tomaremos el mismo estator de 24 ranuras del ejemplo anterior, para ejecutar en él un devanado tetrapolar, es decir, para 1.500 r.p.m. de velocidad sincrónica. Consultada la tabla del capítulo anterior, resulta que se puede hacer a ocupación total de ranuras.

Se marcan las 24 ranuras nuevamente, como se ve en la figura 209, numerándolas, y se procede a calcular los valores característicos del bobinado.

Ranuras por polo y fase.

De acuerdo con la expresión ya vista, este número está dado por:

$$\frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ ranuras por polo y por fase}$$

de modo que debajo del primer polo Norte, sólo corresponderán las ranuras 1 y 2 a la fase 1; las otras cuatro pertenecen a las fases restantes en la

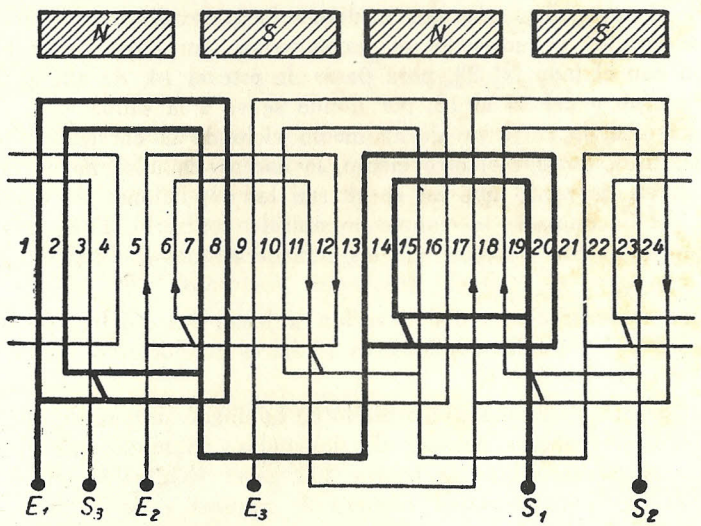

FIG. 209. — Bobinado de cuatro polos con cabezas en dos planos.

forma como veremos. También pertenecerán a la fase 1 dos ranuras debajo de cada uno de los otros polos, que distarán de las 1 y 2 una cantidad de ranuras igual al paso medio o polar.

Paso polar.

Como se trata de 24 ranuras y cuatro polos, el paso está dado por el cociente entre esas dos cantidades, es decir, por:

$$\text{paso polar} = \frac{24}{4} = 6 \text{ ranuras}$$

Tomando 6 ranuras como paso medio, los pasos resultan 5 y 7, respectivamente, por lo que los lados de bobina 1 y 2 deben unirse a los 7 y 8, en la forma como se ve en la figura, es decir, formando rectángulos de distinto ancho y longitud, como en todo devanado en cadena.

Contando 6 ranuras desde las 7 y 8 se llega a las 13 y 14, y de éstas a las 19 y 20, las que pertenecerán a la fase 1. Se las une entre sí, en forma simétrica con respecto a las que ya tenemos trazadas, es decir, conectando 13 con 20 y 14 con 19, como se ve en la figura.

Paso de fase.

Si la entrada de la fase 1 está en la ranura Nº 1, la entrada de la fase 2 debe distar de aquí una cantidad igual al paso de fase, que vale:

$$\text{paso de fase} = \frac{2 \times 24}{3 \times 4} = \frac{48}{12} = 4 \text{ ranuras}$$

La fase 2 debe pues, entrar en la ranura 5 y la 3 en la ranura 9, como se ve en la figura.

Las salidas estarán desplazadas de la misma cantidad de ranuras, para tener un sistema eléctrico que guarde defasajes angulares de 120° entre sí.

Se pueden ahora trazar las dos bobinas de la fase 2, uniendo el lado 5 con el 12 y el 6 con el 11. Las otras dos bobinas de la fase 2 se encuentran opuestas, después de cumplir nuevamente el paso polar, es decir, son los lados 17 y 18, unidos con los 24 y 23, respectivamente.

Idénticas consideraciones permiten dibujar los grupos de bobinas pertecientes a la fase 3, pues entrando por el lado 9, se lo une con el $(9 + 7 = 16)$ 16 y el 10 con el 15, formando el primer grupo. El segundo grupo dista de éste un paso polar, es decir, estará formado por los lados Nº 21 y 22 unidos a los 4 y 3, respectivamente.

Falta ahora determinar las conexiones frontales para interconectar las bobinas entre sí.

Conexiones frontales.

Recordando lo dicho acerca de los sentidos de las corrientes de circulación durante medio ciclo, se puede marcar como corrientes ascendentes las de los lados de bobinas ubicados debajo de los polos Norte y descendentes, debajo de los Sud. En la figura 209 lo hemos hecho para la fase 2, notándose que si la entrada de corriente está en 5, se pasa al 12, de éste al 6, de aquí al 11, y la conexión frontal debe unirlo con el 17 para tener circulación continua en un sentido.

Del Nº 17 pasamos al 24, de él al 18, de aquí al 23 y a la salida. Para las fases 1 y 2 haríamos lo mismo, pero debemos resaltar una circunstancia que puede inducir a error. Las tres entradas de corriente son imaginarias, pues no es posible que un sistema trifásico tenga sus tres corrientes coincidentes en dirección en un momento determinado, cumpliéndose tal coincidencia a lo sumo para dos fases. En el caso de la figura 209, tal coincidencia se cumple para las fases 1 y 2, pero para las tres resulta el sentido de circulación contrario. No por esto debe cambiarse la entrada de corriente por la salida, sino que deben dejarse las letras que resultaron de la consideración del "paso de fase" que es lo único que se mantiene al transcurrir un ciclo

completo de la corriente alternada, pues los sentidos de corrientes con cambiantes y se alternan en las tres fases cíclicamente.

Con lo dicho, queda terminado el trazado del bobinado, como lo muestra la figura 209. Resulta con cabezas en dos planos, aunque podría haberse hecho en tres planos, pero sin ventajas de índole económica, pues se emplearía más cobre, aunque algunos constructores afirman que el desequilibrio producido por tener una misma fase dos grupos de bobinas en serie que tienen entre sí distinta dimensión es de importancia. En realidad, es más importante el desequilibrio entre fases producido por el devanado en tres planos, pues así resultan distintas las bobinas de cada fase entre sí.

Bobinado de cuatro polos con cabezas en tres planos

A efectos de dar otro ejemplo de cálculo y trazado de un bobinado, consideraremos el caso de una máquina de cuatro polos, o sea con 1500 revoluciones por minuto de velocidad sincrónica que tiene 48 ranuras en el

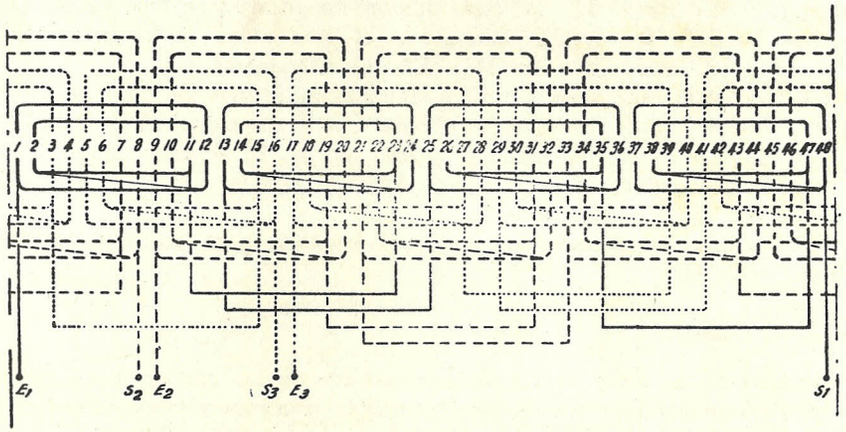

FIG. 210. — Bobinado de cuatro polos con cabezas en tres planos.

estator. Haremos un trazado con cabezas en tres planos, justamente para notar las diferencias constructivas.

Para evitar repetición de consideraciones ya hechas, mostramos en la figura 210 el bobinado ya trazado, con las siguientes operaciones básicas:

$$\text{ranuras por polo y fase: } \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

Consultada la tabla del capítulo anterior vemos que puede hacerse un bobinado a ocupación total de ranuras.

$$\text{paso polar: } \frac{48}{4} = 12$$

$$\text{paso de fase: } \frac{2 \times 48}{3 \times 4} = 8$$

Quiere decir que entre ejes de bobina habrá una distancia de 12 ranuras y entre las entradas de cada fase y la siguiente habrá 8 ranuras. En la figura 210 se han numerado las ranuras de 1 a 48, y se han trazado las bobinas de la fase 1 con línea llena, correspondiendo en el dibujo a las más cortas. La fase 2 tiene línea de trazos y son las más largas y la fase 3 tiene línea punteada. No dibujamos los polos para que el lector ensaye de acostumbrarse a trazar un bobinado sin ese aditamento en el dibujo, ya que en la realidad, si se trata de un motor asincrónico, los polos no tienen un significado real sino teórico.

Para las conexiones frontales se sigue el mismo criterio sustentado en los ejemplos anteriores. Obsérvese que en este caso, por haber doble número de ranuras por polo y fase que en el ejemplo anterior, habrá también mayor número de conexiones frontales, y el aspecto del bobinado presenta mayor número de secciones en serie.

Bobinado de seis polos con cabezas en dos planos

Para poder realizar un bobinado de seis polos, a ocupación total de ranuras, no sirve el estator de 24 ranuras de los ejemplos anteriores, pues la cantidad de ellas debe ser divisible por 3 p, es decir, por $3 \times 6 = 18$.

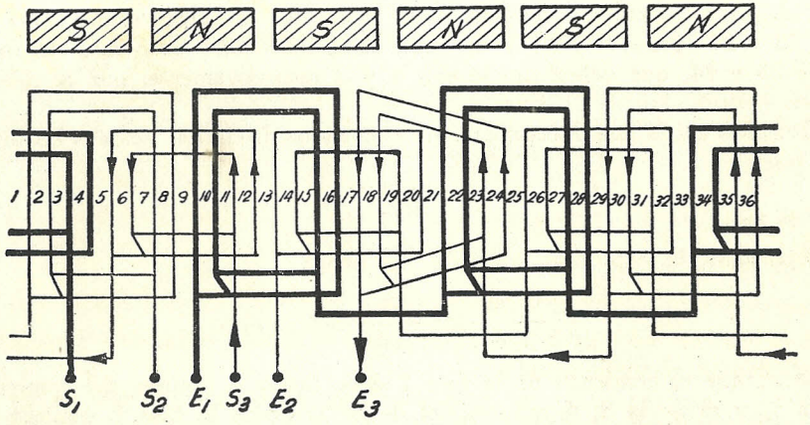

FIG. 211. — Bobinado de seis polos con cabezas en dos planos (una trapecial).

Si tomamos 18 ranuras únicamente, tendríamos un bobinado concentrado, poco usado, de modo que para tener más de una ranura por fase y polo necesitamos por lo menos 36 ranuras (resultan 2 ranuras por fase y polo).

Adoptamos un estator de 36 ranuras, como se puede ver en la figura 211. Colocamos los polos en la parte superior, para facilitar la tarea de encontrar los sentidos de circulación de la corriente.

Ranuras por polo y fase.

Ya se dijo que su número resulta del cociente:

$$\frac{36}{3 \times 6} = 2 \text{ ranuras}$$

Con lo que habrá dos ranuras por cada polo y fase, es decir, que se tendrán seis pares de ranuras para la fase 1, seis para la 2, etc. Esto dice que, como cada par de ranuras forma una bobina, tendremos tres grupos de bobinas para cada fase, y cada grupo tendrá dos bobinas.

Paso polar.

Como el número de ranuras es 36 y el de polos, 6, el paso polar es el cociente de ambos números, es decir:

$$\frac{36}{6} = 6 \text{ ranuras}$$

que será, a la vez, el paso medio del bobinado. Si comenzamos la fase 1 en la ranura 9, por ejemplo, deberá unírsela con la 16, pues el primer paso es mayor que el polar, mientras que la 10 debe unirse con la 15, para cumplir un paso 5 y tener el promedio 6 entre los dos pasos.

La misma fase 1 tendrá, además, los lados de bobinas que disten un paso de los ya tomados, como son los 21 y 22, que se unirán respectivamente con 28 y 27 (pasos 7 y 5) y de aquí, cumpliendo otro paso más llegamos a los 33 y 34, que deben unirse con 4 y 3 respectivamente, por la misma razón.

Tenemos así la fase 1 completa, sin conexiones frontales. Veamos las otras dos fases.

Paso de fase.

Aplicando la expresión conocida, se tiene:

$$\frac{2 \times 36}{3 \times 6} = \frac{72}{18} = 4 \text{ ranuras}$$

es decir, que el comienzo de la fase 2 debe distar 4 ranuras del comienzo de la 1, y el de la 3, 4 ranuras del de la 2. Como la fase 1 empieza en la ranura 9, la 2 debe entrar en la 13 y la 3 en la 17.

Ahora se pueden trazar los grupos de bobinas correspondientes a la fase 2, pues se tiene el comienzo de la misma. Para ello basta cumplir un paso largo de 7 y uno corto de 5, avanzar 6 ranuras simétricamente y cumplir nuevamente los pasos, tal como se hizo para la fase 1.

Tendremos entonces, unidos los lados 13 con 20 y 14 con 19; los 25 con 32 y 26 con 31; los 1 con 8 y 2 con 7, saliendo por este último. En forma idéntica tendríamos la fase 3.

Conexiones frontales.

De acuerdo con consideraciones hechas en ejemplos anteriores, se determinan los sentidos de corriente en cada fase, teniendo presente que ellos coincidirán en dos fases cualesquiera. En la figura 211 hemos marcado los sentidos en la fase 3, que son coincidentes con los de la fase 2 y contrarios a los de la 1.

Para determinar las posiciones de las conexiones frontales, no interesan los sentidos relativos entre fases, sino seguir uno cualquiera para una de las fases. Partiendo pues, de la entrada de la fase 3 (o de la salida, pues se obtiene el mismo resultado), se sigue un sentido de circulación, notando que debe unirse el lado N° 23 con el 29 y el 35 con el 5, para tener circulación cerrada. Esos puentes son las conexiones pedidas para la fase 3.

Para la fase 1 resultan unidos los lados 15 con 21 y 27 con 33, y para la 2, los 19 con 25 y 31 con 1. Las conexiones internas también están marcadas en la figura, y no tienen dificultad, pues interconectan las distintas bobinas de un mismo grupo, siguiendo un sentido de circulación determinado, sin invertirlo. Tanto las conexiones frontales como las internas se hacen con un conductor único, mientras que las bobinas tienen varias espiras formando un paquete de conductores activos, según se ha dicho anteriormente. Para simplificar el dibujo se traza solamente una espira de la serie.

Conexiones a la caja de bornes

Todos los devanados trazados hasta aquí, que respondían a distintas características en lo que respecta al número de polos, de ranuras o a las formas y tamaños de las bobinas, tenían en cada fase una entrada y una salida. La entrada de cada fase se la designaba con la letra E, con un subíndice 1, 2 y 3, que indicaba la fase; las salidas se marcaban con la letra S y tenían los mismos números inferiores que las entradas.

Terminado el trazado del devanado, con todos sus puentes internos y de interconexión entre grupos de bobinas, hay que conectarlo a la red, pero para evitar los terminales sueltos, se utiliza una caja de bornes, a la que llegan los conductores de entrada y salida, unidos a bornes convenientes, los que, a su vez se unen a la red trifásica.

La figura 212 muestra las dos conexiones posibles, denominadas "estrella" y "triángulo" por el aspecto que presentan sus símbolos.

Conexión en triángulo.

Se usa generalmente para las redes de tres conductores, y en ella, se conectan las tres secciones del bobinado que corresponden a otras tantas fases, en serie entre sí, uniéndose los puntos comunes a los tres conductores de la red, como se ve en la figura 212.

La tensión aplicada a una fase del devanado es igual a la que hay entre dos hilos de la red, siendo en los casos más comunes, de 220 Volt.

Conexión en estrella.

En este montaje, los extremos de salida de las tres secciones del bobinado se unen entre sí formando lo que se denomina "punto neutro" y los otros tres extremos, que hemos llamado de "entrada", se conectan cada uno a un hilo de la red.

Si la red tiene cuatro conductores, uno de ellos está unido a tierra, cons-

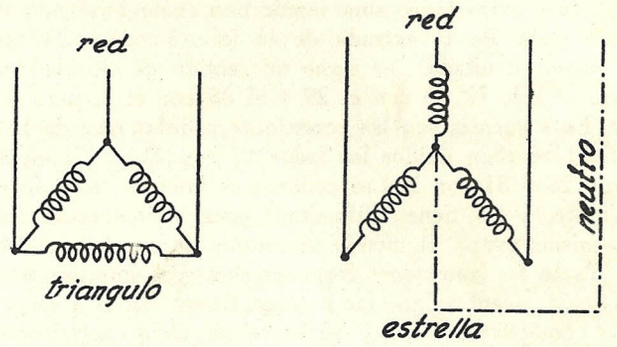

FIG. 212. — Esquema de conexiones de las tres fases del motor a la red.

tituye el "neutro", y se conecta al punto neutro del bobinado, que también se conecta a masa de la máquina.

La tensión aplicada a cada fase del devanado es menor que la que hay entre dos conductores de la red, y vale, para ser más precisos:

$$\text{tensión por fase} = \frac{E}{1{,}73}$$

si E es la tensión entre dos hilos de la red, en Volt.

Generalmente E es 380 Volt, con lo que a cada fase del motor se le aplican 220 Volt, es decir, la misma que en el caso de conexión en triángulo. Se ve que la diferencia está en las redes y no en los motores, en la mayoría de los casos. La diferente forma de conectar las fases del devanado son debidas a la necesidad de adaptar cada sección del mismo a la tensión disponible en la línea.

Hay otros casos en que las tensiones no son las dadas más arriba, como ejemplo, pero la relación dada para las dos tensiones se mantiene para cualquier red trifásica simétrica. Está claro que un motor tomará más corriente por hilo de la red en la conexión triángulo que en la estrella.

Caja de bornes.

La caja de bornes de la máquina debe disponerse de forma tal que resulte cómoda la conexión de la misma a la línea. En el caso de los generadores de corriente alternada, es poco probable el cambio de montaje del devanado, pero en los motores es más frecuente. En efecto, cuando se cambia

el motor de lugar de instalación, puede suceder que se encuentre una línea de sistema estrella cuando antes era triángulo, o viceversa, imponiéndose el mismo cambio en el devanado. Además, hay casos en que el cambio se hace con un conmutador cada vez que el motor deba ponerse en marcha; es el arranque por conmutación "estrella-triángulo" que se efectúa para reducir la intensidad de corriente que alcanza en el instante inicial valores muy grandes.

Por todas estas razones, en los motores eléctricos de corriente alternada se suele disponer en la caja de bornes de seis terminales, correspondiendo los mismos a las entradas y salidas de cada sección del bobinado, a fin de poder hacer las conexiones en la forma más conveniente y cambiarlas cuando sea oportuno.

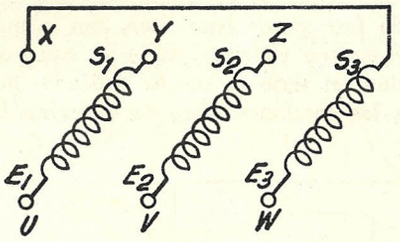

FIG. 213. — Esquema de conexiones de las tres fases del estator a la caja de bornes.

La figura 213 muestra la disposición de los terminales de una caja de bornes de un motor trifásico, los que están colocados en dos series, una inferior y otra superior. La inferior tiene unidos a cada terminal las entradas de las secciones del devanado y la superior, las salidas, pero con un desplazamiento.

En efecto, la primer sección tiene su entrada unida al terminal marcado U, pero la salida no está unida al primero de la serie superior, sino al segundo, es decir, al Y; la segunda sección o fase del bobinado está unida en su entrada al V y en la salida al Z; la tercera, similarmente, al W y al X, debiéndose, para esta última conexión, pasar al otro lado de la caja de bornes.

El objeto de estos cruces de conexiones en lugar de hacerlas en forma vertical y en el mismo orden para las dos series, es el poder hacer puentes de conexión entre fases y cambiar fácilmente de montaje triángulo a estrella. La figura 214 muestra la forma de realizar esto. Haciendo un puente entre los tres terminales superiores y conectando la red a cada terminal inferior, se ve, por comparación con las figuras 212 y 213, que se ha conectado el bobinado en estrella. Dejando la red conectada a los bornes inferiores, y haciendo tres puentes verticales, como se ve en la misma figura 214, sección derecha, y comparando con las figuras anteriores, se ve que se ha conectado en triángulo.

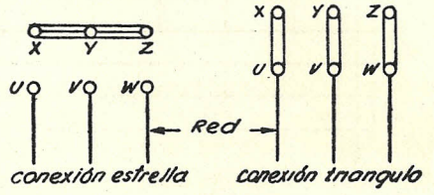

FIG. 214. — Puentes a hacer entre bornes para conectar en estrella o en triángulo.

Resumiendo, los tres terminales inferiores, marcados U, V y W, son para los tres conductores de la red, y haciendo puentes horizontales superiores se conecta en estrella, y con tres puentes verticales, en triángulo.

Inversión del sentido de giro.

Si una vez conectado el motor, se observara que el sentido de rotación no es el deseado, basta invertir dos de los hilos de la red de los terminales U y V, u otros dos cualesquiera, pasando el que estaba en U a V y viceversa, para tener sentido de giro contrario.

Devanados en cadena con ramas en paralelo

En los bobinados vistos en este capítulo todas las secciones de cada fase se conectaban en serie. En realidad, cada fase puede tener uno, dos o más carretes o secciones, y esas secciones se pueden conectar en serie, como se ha visto antes, o en paralelo. La conexión en serie es menos delicada, por no interesar las diferencias físicas entre las secciones. Para la conexión de

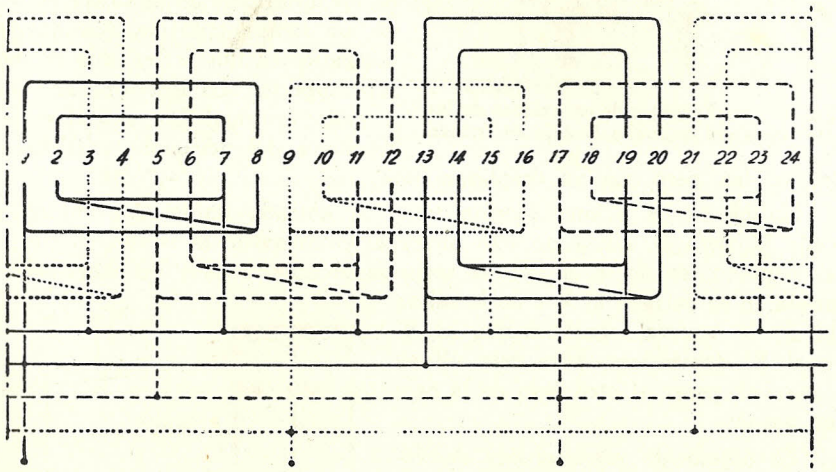

FIG. 215. — Bobinado en cadena con bobinas en serie para máquina de 4 polos y cabezas en 2 planos.

secciones en paralelo puede interesar que el reparto de las corrientes en las ramas en una misma sección se haga en forma exacta, y las diferencias de resistencia y de reactancia entre esas ramas no permiten esa repartición exacta. No obstante, cuando las diferencias son pequeñas es admisible ejecutar el bobinado con dos o más ramas en paralelo.

Veamos directamente un ejemplo de bobinado con dos ramas en paralelo, para un motor de cuatro polos y 24 ranuras en el estator (figura 215). Las cabezas se ejecutan en dos planos, y el trazado del bobinado no difiere en absoluto de la figura 209 que representa un bobinado igual en el trazado pero con cada fase con sus secciones en serie.

La pregunta lógica es: ¿dónde está la diferencia? Pues en las conexiones

frontales, que en lugár de unir directamente la salida de una sección de la fase con la entrada de la otra, las pone en paralelo. El bobinado queda conectado directamente en estrella, tal como se puede comprobar en la figura 215. Los pasos de bobinado y polar, no difieren de los calculados para la figura 209, pero hay diferencias en el paso de fase, que es en este caso de 8 ranuras. Pero no hay que olvidar que este detalle resulta de este tipo de trazado.

Las conexiones frontales toman en este bobinado el carácter de anillos que se hacen en la cabeza del estator, todos de un mismo lado, en la forma como se ve en la figura, y en número de cuatro. Igual procedimiento se seguiría para realizar bobinados con ramas en paralelo de diferentes datos, pero como hemos dicho que requieren ciertas precauciones constructivas, no insistiremos sobre ello.

CAPITULO XIX

BOBINADOS TRIFÁSICOS IMBRICADOS O DE BOBINAS IGUALES

En el capítulo XVII se establecieron las ventajas de índole económica que imponían actualmente los devanados imbricados para el estator, en motores de potencias no muy grandes. La ventaja más importante es que se trata de un bobinado en plantilla, es decir, con molde para hacer las bobinas, que son entonces todas iguales, colocándolas a mano dentro de las ranuras, después de hechas. La denominación de "imbricados" viene de la similitud con los devanados de igual nombre en las máquinas de corriente continua.

Pueden ser, estos devanados, de una o de dos capas, existiendo entre ambos diferencias de índole constructiva. En la teoría se puede prescindir de tal consideración, si se numeran los distintos lados de bobina en forma correlativa, tocando entonces siempre un número impar al lado exterior y par al interior. Cuando se ejecuta el bobinado, es indiferente encontrar los conductores superpuestos o apareados, si se los ha numerado a todos correlativamente.

El aspecto de las bobinas, formada cada una de ellas por un haz de conductores, es trapezoidal una vez colocada, pero al hacerla, si no lleva alambres muy rígidos, puede ser circular u oval y darle la forma requerida al colocarla. En los devanados de doble capa, el lado de bobina más corto suele colocarse debajo del más largo.

Paso del bobinado

En el capítulo anterior hemos visto que en los bobinados en cadena, el paso de una bobina era, en término medio, igual al polar, es decir, que un lado de bobina estaba debajo de un polo y el otro debajo del polo de nombre contrario inmediato, en posición simétrica con respecto a él.

Si el paso se reduce un poco, la f.e.m. inducida se reducirá también,

pero se economiza cobre por reducción de longitud del devanado, y precisamente en las cabezas de bobinas, donde no se utiliza. La reducción de f.e.m. no es tan importante si el acortamiento del paso es reducido y la ventaja económica, unida a la mejor disposición de la cabeza de bobina y la facilidad de ejecución, han hecho adoptar el paso corto para los devanados imbricados.

La reducción es, aproximadamente, 1/6 del paso polar, de modo que el paso será más o menos:

$$5/6 \text{ del paso polar}$$

Como el paso polar estaba dado, en función del número de ranuras y de polos, por la expresión:

$$\text{paso polar} = \frac{\text{Número de ranuras}}{\text{Número de polos}} = \frac{N}{p}$$

con esta cifra se podrá adoptar el paso del bobinado, tomando la proporción de él dada más arriba, aproximadamente.

El máximo teórico de reducción del paso es la mitad del paso polar, pues en tal caso se produciría una inversión de las corrientes inducidas. Nunca se llega cerca de esa cifra, si se adopta la proporción de reducción propuesta.

Paso de fase

En la misma forma que para los bobinados en cadena, se debe tener que las tres fases del devanado deben estar desplazadas en la periferia del estator de 120° eléctricos, para tener un sistema trifásico regular. En las máquinas bipolares, el desplazamiento geométrico coincide con el eléctrico, de modo que corresponderá separar las tres fases de la tercera parte del desarrollo del estator.

Para mayor número de polos, ya se vió en el capítulo anterior la relación que había entre los defasajes eléctricos y los desplazamientos geométricos, lo que podría aplicarse aquí, pero resulta más sencillo determinar el paso de fase, o cantidad de ranuras que debe haber entre las entradas y salidas de cada fase, mediante la expresión ya conocida:

$$\text{paso de fase} = \frac{2N}{3p}$$

que permite, en cada caso, calcular exactamente la distancia medida directamente sobre el estator, y contada como número de ranuras que debe mediar entre una fase y la siguiente, lo mismo para los principios como para los fines de bobinas de cada fase.

Así, por ejemplo, un estator de 36 ranuras, con seis polos, el paso de fase resulta igual a:

$$\frac{2 \times 36}{3 \times 6} = 4 \text{ ranuras}$$

que será la cantidad que debe contarse entre las entradas de cada fase del bobinado, o las respectivas salidas.

EJEMPLOS DE BOBINADOS IMBRICADOS

Con las consideraciones precedentes, y tomando como base el capítulo anterior que daba los trazados de bobinados en cadena, se puede encarar el

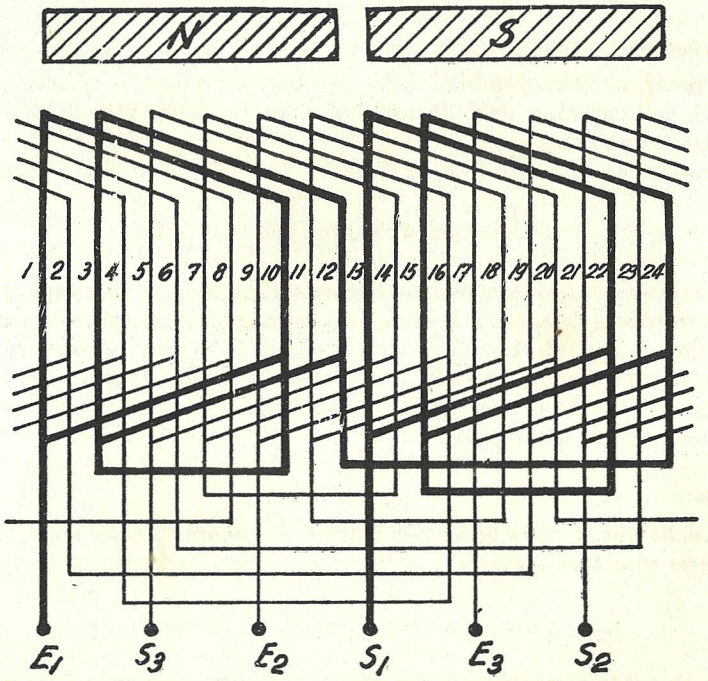

FIG. 216. — Bobinado imbricado de dos polos a simple capa con 24 ranuras o a doble capa con 12 ranuras.

proyecto de algunos casos frecuentes de bobinados trifásicos del tipo imbricado, lo que permitirá familiarizar al lector con el tema, y le ayudará a resolver otros casos, por similitud.

Por razones de simplicidad, elegiremos como ejemplo estatores de número reducido de ranuras, pues no habrá ninguna dificultad en ampliar el problema a casos más numerosos.

Bobinado imbricado de dos polos

Tomemos un estator de 24 ranuras para un motor de 3000 revoluciones por minuto, es decir, de dos polos, y proyectemos un devanado del tipo imbri-

cado para el mismo. Como en casos anteriores, se trata de una máquina trifásica.

La figura 216 muestra el bobinado terminado. Se comienza por numerar las ranuras de 1 a 24, y como hemos dicho que las bobinas tendrán forma trapezoidal, se pueden dibujar desde ya, alternadamente, un lado largo y uno corto, tal como se ve en la figura. Este bobinado es a simple capa, pero el dibujo sirve para uno a doble capa con 12 ranuras. Los trazos cortos van en el fondo de la ranura y los largos arriba.

Ranuras por polo y fase.

Sabemos que esta cantidad debe resultar un número entero, para un devanado de ocupación total de ranuras, pues en caso contrario habría que dejar algunas vacías.

En el caso de la figura 216, se tiene:

$$\frac{24}{2 \times 3} = 4 \text{ ranuras por polo y fase}$$

En el caso de los bobinados imbricados, aunque sean de una capa, se toman como correlativos los lados de bobinas de numeración par o impar, pero siempre los de un solo tipo. En nuestro ejemplo, elegiremos para la fase 1, los lados ubicados en las ranuras 1 y 3, para el primer grupo y los lados 13 y 15, para el segundo, pues ambos grupos deben estar separados simétricamente con respecto a los polos.

Paso polar.

Está dado por el cociente entre el número de ranuras y el de polos, de modo que en este caso será igual a:

$$\text{paso polar} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$$

cosa que se puede comprobar fácilmente en la figura, pues es la distancia entre ejes de polos, tomada como cantidad de ranuras.

Paso del bobinado.

Dijimos que era más o menos 5/6 del paso polar, preferiblemente impar, por lo que tendremos:

$$\frac{5 \times 12}{6} = 10, \text{ pero se adopta} = 9 \text{ ranuras}$$

con el cual se puede trazar todo el devanado.

En efecto, basta unir el lado de bobina ubicado en la ranura Nº 1 con el que está 9 ranuras más adelante, o sea en la Nº 10 y formar con ambos una espira cerrada. Ya se dijo que lo que en el dibujo aparece como una espira, es en realidad un haz de conductores arrollados en la misma forma que la

espira básica, y disponiéndose de un terminal de entrada y otro de salida, que son los que se utilizan para las conexiones frontales.

La bobina siguiente del grupo primero de la fase 1, era la formada por el lado 3 con el 12, pues deben distar ambos 9 ranuras entre sí; 13 con 22 y 15 con 24 forman el otro grupo de bobinas de la fase 1.

En forma similar se dibujan las bobinas de las otras fases, pero conviene hacer una aclaración: para el trazado del devanado, puede prescindirse de considerar las fases y los polos, pues basta dibujar 12 bobinas iguales a la primera de ellas, que se traza conociendo el paso, y dejando las interconexiones de las mismas para más adelante. En la práctica ejecutiva, éste es el procedimiento, pues se hace una plantilla que tiene la forma que tendrá luego la bobina terminada, se hacen 12 bobinas (o la cantidad necesaria) iguales y se colocan en el estator, sin pensar en las conexiones entre ellas. Cada bobina tiene dos terminales, que son los necesarios para las conexiones internas y frontales.

En la figura 216, lo dicho corresponde a las 12 bobinas iguales de forma trapezoidal, sin incluir los puentes que aparecen en la parte inferior de la figura.

Paso de fase.

Para determinar los puntos de entrada y salida de cada fase del bobinado, basta fijar uno de ellos, el de la fase 1 por ejemplo, que lo hemos colocado en la ranura Nº 1, designándolo con E_1, para tener los demás. Para ello calculemos el paso de fase:

$$\frac{2 \times 24}{3 \times 2} = 8 \text{ ranuras}$$

La entrada E_2 de la fase 2 estará, pues, 8 ranuras más adelante, es decir, en la ranura Nº 9 y la de la fase 3 en la Nº 17, como se ve en la figura.

Las tres salidas estarán también separadas de 8 ranuras, pero para ubicarlas hay que conocer previamente la salida de la fase 1, por ejemplo. Para ello debemos considerar los sentidos de corriente, los que permiten también conocer las conexiones frontales a realizar. Si se trata de un bobinado a doble capa con 12 ranuras, todos los pasos los contamos como lados de bobina.

Conexiones frontales.

Asignando un sentido determinado de circulación a la corriente en los conductores del estator, sentido que se mantendrá durante medio ciclo, para invertirse luego, se puede seguir el recorrido de la misma. Supongamos que debajo del polo Norte la corriente es ascendente y debajo del Sur, descendente. La circulación debe ser cerrada, entrando por E_1 para salir por el terminal final de la fase 1.

Conviene aclarar que como el paso es menor que el polar, los sentidos no estarán bien definidos como en el caso de los bobinados en cadena, pero supondremos que el paso es igual al polar al solo efecto de tener una circulación cerrada.

Si en los lados 1 y 3 la corriente asciende, en los 10 y 12 debería descender, por lo que debe unirse 10 con 3, en el primer grupo de bobinas de la fase 1. El segundo grupo comienza en la ranura 13, pero en ese lado la corriente desciende, de modo que el puente entre el último lado del grupo 1 (lado 12) debe hacerse con el final del grupo 2 es decir, con el lado Nº 24 y 15 con el 22.

Siguiendo el sentido de circulación supuesto, la salida de la fase 1 estará en el lado Nº 13, tal como se ha indicado en la figura. Las salidas de las fases 2 y 3, estarán pues, en las ranuras 13 + 8 = 21 y 21 + 8 = 29, pero como sólo hay 24 ranuras, en la Nº 5, respectivamente.

Las conexiones frontales de las otras dos fases se hacen en forma idéntica que para la fase 1, y siguiendo el mismo criterio, es decir, se unirá 18 con 11 y 20 con 8 para la fase 2, y 2 con 19 y 4 con 16 para la fase 3, respectivamente, con lo que queda terminado el bobinado.

Bobinado imbricado de cuatro polos

Tenemos un estator de 24 ranuras, igual al anterior pero para un motor de 1500 vueltas por minuto, es decir, que debe ser de cuatro polos. Veremos cómo se traza el bobinado.

Se comienza por dibujar los 24 lados de bobina, uno corto y uno largo alternativamente, como se hizo anteriormente y como se puede ver en la figura Nº 217. Se los numera del 1 al 24. Este bobinado puede tomarse como doble capa, considerando 12 ranuras, y contanto los pasos como lados de bobina y no como ranuras.

Ranuras por polo y fase.

Por similitud con ejemplos anteriores, se calcula inmediatamente la cantidad de ranuras por polo y fase que corresponden a este caso, que sabemos que debe ser número par entre 2 y 8, pues si diera 1 sería un devanado concentrado en lugar de distribuído. La fórmula da:

$$\frac{24}{3 \times 4} = 2 \text{ ranuras por polo y fase}$$

lo que dice que puede ejecutarse un bobinado a ocupación total de ranuras. Esta conclusión puede obtenerse también por simple observación de la tabla dada en el capítulo XVII, que da la posibilidad enunciada.

Paso polar.

Debe resultar igual a la mitad del dado en el ejemplo anterior, pues tenemos igual cantidad de ranuras pero doble número de polos. En efecto:

$$\frac{24}{4} = 6 \text{ ranuras}$$

tal como se ve en la figura 217.

Paso del bobinado.

Como en el ejemplo anterior, se toma una fracción del paso polar, para tener lo que se llama "paso corto" Esta fracción es 5/6 de modo que:

$$\text{paso del bobinado} = \frac{5 \times 6}{6} = 5 \text{ ranuras}$$

quedándonos con el número obtenido.

Se puede trazar el bobinado con solo conocer el paso, en la forma que se puede ver en la figura 217. Basta unir el conductor Nº 1 con el Nº 6 y hacer

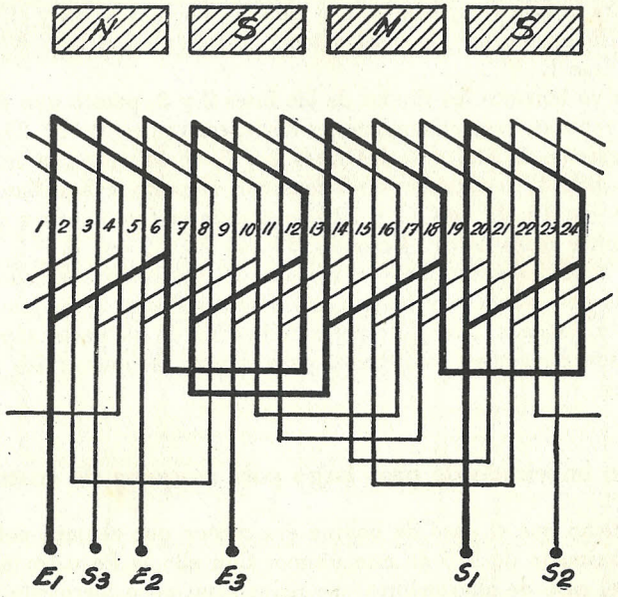

FIG. 217. — Bobinado imbricado de cuatro polos con paso corto, a simple capa con 24 ranuras o a doble capa con 12 ranuras.

la bobina cerrada; el Nº 3 con el 8 y así sucesivamente, uniendo siempre un lado largo con el corto que dista de él 5 ranuras.

Por el momento no nos preocupemos de las fases ni de las conexiones frontales, las que serán ubicadas más adelante.

Paso de fase.

Basta aplicar la expresión conocida, para saber el número de ranuras que debe mediar entre los comienzos y fines de secciones de bobinados que corresponden a cada fase:

$$\frac{2 \times 24}{3 \times 4} = 4 \text{ ranuras}$$

La entrada de la fase 1 se la supone en la ranura Nº 1, luego la de la fase 2 estará en la Nº 5 y la de la 3 en la Nº 9. Las salidas estarán distanciadas también de 4 ranuras, pero hay que encontrar previamente la ubicación de la salida 1.

Conexiones frontales.

En la misma forma como se procedió en el ejemplo anterior se puede encontrar la ubicación de puentes de conexión entre los extremos de cada bobina. Suponiendo un sentido de circulación de la corriente en las espiras del bobinado, y asignando tales sentidos como si el paso fuera igual al polar, se ve que para la fase 1, se debe unir el lado Nº 6 con el Nº 12 y el 7 con el 13, para pasar finalmente del 18 al 24 y tener la salida en el lado Nº 19, que es el fin de la fase 1.

Con esto ya tenemos los finales de las fases 2 y 3, puesto que deben distar de S_1 4 y 8 ranuras, respectivamente, es decir, estarán en las Nº 23 y 3.

Las conexiones frontales de las fases 2 y 3, se hacen en la misma forma que para la fase 1, resultando simétricas con respecto a aquéllas. Se unirán los lados 10 con 16, 11 con 17 y 22 con 4 para la fase 2; para la fase 3 se conectarán entre sí los lados 14 con 20, 15 con 21 y 2 con 8.

Con esto tendremos terminado el trazado del bobinado, marcadas las entradas y salidas de cada fase y hechas las interconexiones entre las bobinas de cada grupo y de cada fase. Los polos indicados en la parte superior de la figura 217 son puramente subjetivos, para ayudar a obtener los sentidos de las corrientes.

Bobinado imbricado de paso largo para máquina de cuatro polos

Hemos dicho que el paso de bobina era menor que el paso polar, en proporción aproximada de 5/6 de este último. Con ello la f.e.m. inducida en las espiras (en el caso de alternadores) se reducía un poco, pero ello se compensaba con la disminución de cobre por acortamiento de las cabezas de bobina y con la mejor disposición de las mismas.

Si el paso de bobina es mayor que el polar, en proporción similar, es decir 1/6 mayor más o menos, la reducción de f.e.m. se mantiene, pero la menor longitud de las cabezas no, siendo por el contrario, mayor que en las bobinas de paso polar.

Sin embargo, a veces se encuentran devanados con paso mayor que el polar, que se denominan "de paso largo", por lo que daremos un ejemplo a título informativo, y para apreciar las diferencias que se producen con el de paso corto.

A fin de establecer mejor estas diferencias tomaremos la misma máquina del ejemplo anterior, con 24 ranuras en el estator y con cuatro polos (1500 r.p.m.).

En la figura 218 hemos dibujado las 24 ranuras, trazando un lado largo y uno corto, alternativamente, de acuerdo con la práctica recomendada en los ejemplos anteriores.

Paso de bobinado.

Como el paso polar ya se calculó en el ejemplo anterior, y resultó igual a 6 ranuras, tomaremos para el paso de bobina una cantidad 1/6 mayor, más o menos, es decir:

$$\frac{7 \times 6}{6} = 7 \text{ ranuras}$$

que es el paso adoptado.

El lado de bobina ubicado en la ranura 1 debe unirse con el que está en

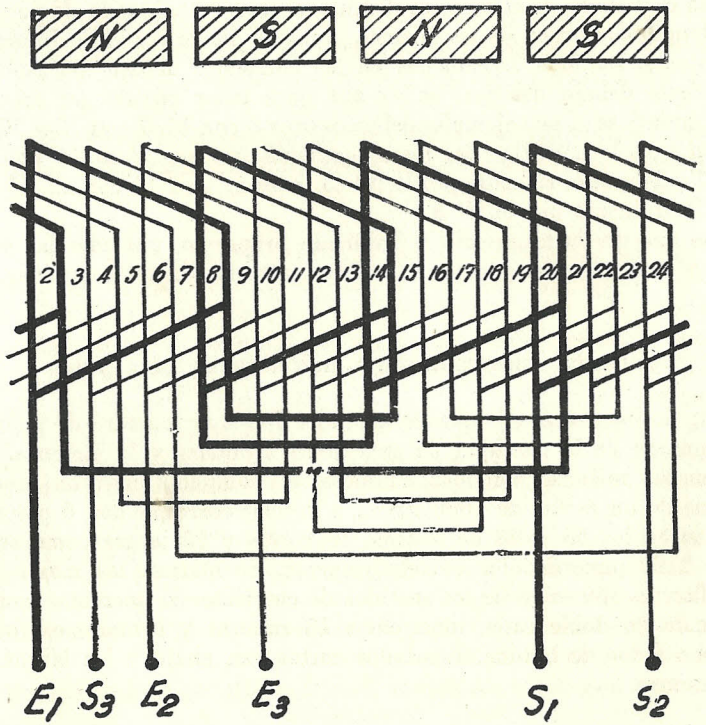

Fig. 218. — Bobinado imbricado de cuatro polos con paso largo.

la Nº 8 y se forma con ambos la bobina primera. Las 11 restantes se construyen de forma idéntica, dibujándoselas todas como se ve en la figura 218.

Paso de fase.

Como la expresión que da el paso de fase es independiente del paso de bobina, pues depende del número de ranuras y de fases, aquél no variará por el hecho de tener bobinas de paso largo, de modo que se tendrá:

$$\text{paso de fase} = 4 \text{ ranuras}$$

Tomando la entrada de la fase 1 en la ranura Nº 1, las de las fases 2 y 3 estarán en las ranuras Nº 5 y 9, respectivamente. Las salidas estarán también distanciadas de 4 ranuras, y veremos que no se produce ninguna diferencia con respecto al devanado de paso corto, pues la distancia entre entrada y salida de cada fase es la misma en ambos tipos.

La salida de la fase 1 está en la ranura 19 como en el ejemplo anterior, y la salida 2 y 3 en las 23 y 3, respectivamente.

Conexiones frontales.

Si bien el número de ellas no es distinto al caso de bobinado de paso corto, varía la longitud y orden de las mismas, como se puede ver en la figura.

Suponiendo sentidos ascendentes en las corrientes debajo del polo Norte y descendente debajo del Sur, se ve que para tener circulación cerrada de corriente en la fase 1, por ejemplo, debemos unir 8 con 14, 7 con 13 y 20 con 2, saliendo por la Nº 19. Para las fases siguientes tenemos: fase 2; 12 con 18, 11 con 17 y 24 con 6, saliendo por la Nº 23. Fase 3; unir 16 con 22, 15 con 21 y 4 con 10, saliendo por la Nº 3.

Con lo que queda terminado el bobinado propuesto, ubicadas las entradas y salidas y marcados los puentes a realizar entre las distintas bobinas.

Bobinado imbricado para máquina de seis polos

Resulta de interés un ejemplo de máquina de mayor número de polos, para ver el aumento de la cantidad de conexiones frontales y la simetría que se cumple en las mismas. Veremos entonces, el bobinado para un estator de 36 ranuras de un motor de 1000 r.pm., a lo cual corresponden 6 polos.

Se dibujan los 36 lados de bobina, 18 cortos y 18 largos como se ve en la figura 219, numerándolos correlativamente. Se marcan las masas polares para facilitar la obtención de los sentidos de corriente. Si queremos considerar un bobinado en doble capa, tomaremos 18 ranuras y contaremos todos los pasos como lados de bobina. Los lados cortos van abajo y los largos arriba en cada ranura.

Ranuras por polo y por fase.

En forma similar que para los demás devanados, se obtiene la cifra pedida, que resulta, para este caso:

$$\frac{36}{3 \times 6} = 2 \text{ ranuras por polo y fase}$$

es decir que tomaremos debajo de cada polo dos ranuras para cada fase, Marcamos más gruesas las líneas correspondientes a las ranuras 1, 7, 13, 19, 25 y 31, dejando las otras seis que corresponden a la fase 1 para marcarlas una vez que se conozca el paso de bobinas.

Paso del bobinado.

Tomaremos paso corto, es decir, menor que el polar, por ser lo más común. El paso polar es igual a:

$$\text{paso polar} = \frac{36}{6} = 6 \text{ ranuras}$$

con lo que, si se toma una fracción aproximadamente 1/6 menor, resulta un paso de bobina de:

$$\frac{5 \times 6}{6} = 5 \text{ ranuras}$$

que es el que adoptamos en definitiva.

Con esto resulta que los lados de bobinas que pertenecen a la fase 1 y que deben ser unidos a los nombrados más arriba, son los: 6, 12, 18, 24, 30 y 36,

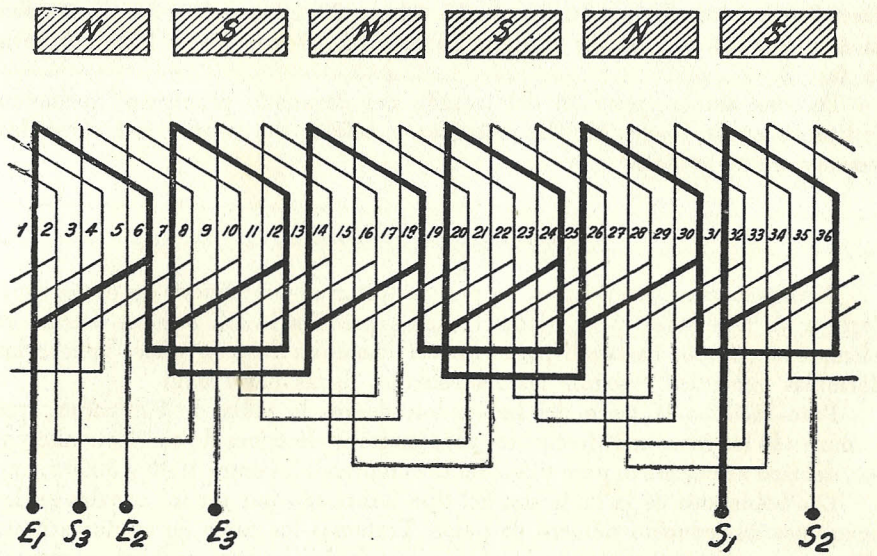

FIG. 219. — Bobinado imbricado de seis polos con 36 ranuras a simple capa o con 18 ranuras a doble capa.

respectivamente, formando con éstos y con los anteriores, bobinas de 5 ranuras de paso. En la misma forma se procede con los lados de bobina pertenecientes a las fases 2 y 3, lo que puede verse en la figura 219.

Paso de fase.

Para determinarlo, se aplica la fórmula conocida, ya vista en los ejemplos anteriores, y tendremos:

$$\frac{2 \times 36}{3 \times 6} = 4 \text{ ranuras}$$

que da inmediatamente la distancia entre las entradas y salidas de cada fase. Si la fase 1 la hacemos entrar en la ranura Nº 1, la 2 entrará en la Nº 5 y

la 3 en la 9. Las salidas aparecerán más adelante, en cuanto se tengan las conexiones frontales.

Conexiones frontales.

Suponiendo corriente ascendente bajo el polo Norte y descendente bajo el Sur, tenemos que, para tener circulación cerrada de corriente, se debe unir el lado 6, por el que baja la corriente, con el 12, por el que sube (hemos supuesto paso igual al polar, por lo que los lados, 6, 12, 18, etc., estarán debajo de los polos siguientes al que figuran en el esquema); el 7 con el 13, el 18 con el 24, el 19 con el 25, el 30 con el 36, para terminar en el 31, lado que conduce a la salida, terminación de la fase 1.

La salida de la fase 2 distará de esta anterior, 4 ranuras, estando por consiguiente, en la ranura 35 y la de la 3 en la 3.

Las restantes conexiones frontales se ven en la figura, pertenecen a las fases 2 y 3, y son: 10 con 16, 11 con 17, 22 con 28, 23 con 29 y 34 con 4, para la fase 2 y 14 con 20, 15 con 21, 26 con 32, 27 con 33, y 2 con 8 para la fase 3.

Termina así la ejecución del trazado del devanado propuesto, quedando indicadas en la figura 219 las entradas y salidas del mismo, así como los puentes entre bobinas.

TABLA DE BOBINADOS

Siguiendo con los ejemplos, se podría tratar un sinnúmero de casos similares a los anteriores, pero resultaría una repetición inútil, pues el sistema es siempre el mismo, bastando para resolver cualquier caso práctico, aplicar las fórmulas generales y seguir las indicaciones dadas hasta aquí.

Para facilitar la tarea del bobinador, damos la tabla de bobinados, que comprende los casos más frecuentes para motores eléctricos de corriente alternada, del tipo asincrónico, para velocidades comprendidas entre 1000 y 3000 r.p.m.

Los bobinados de la tabla son del tipo imbricado por ser los usuales en las máquinas de reducido número de polos. Tratamos los casos de estatores hasta 48 ranuras, porque aumentando el número de las mismas se hace engorrosa la lista de conexiones frontales, y porque no son tan comunes en motores asincrónicos de uso frecuente.

En la tabla se indican, además del número de polos y de ranuras, la numeración de las ranuras de entrada y salida de cada fase del bobinado, y los puentes a hacer entre las bobinas, entendiéndose que el devanado en sí ya ha sido trazado, para lo cual se da el paso. Se puede tomar distinto paso que el propuesto, pero en ese caso la numeración de lados de bobinas que se unen con puentes no se mantiene, sino que habría que obtenerlo mediante las expresiones y reglas vistas en el comienzo del capítulo.

Los grupos de puentes a hacer entre los grupos de bobinas, encerrados entre paréntesis, corresponden a distintas fases, pues se ve en la tabla que para cada bobinado hay tres grupos de puentes, encerrados cada uno de ellos entre paréntesis.

Las entradas y salidas, se entenderá que el primer número se refiere a la fase 1, el segundo a las 2 y el tercero a la fase 3, en ambos casos.

Damos también, a título informativo, el número de ranuras por polo y fase.

TABLA DE BOBINADOS IMBRICADOS

Nº de polos	Nº de ranuras	Ranuras por polo y fase	Paso	Entradas	Salidas	Puentes de interconexión
2	12	2	5	1-5-9	7-11-13	(6-12) (10-4) (2-8)
2	24	4	9	1-9-17	13-21-5	(10-3; 12-24; 15-22) (18-11; 20-8; 23-6) (2-19; 4-16; 7-14)
2	36	6	13	2-14-26	20-32-8	(15-4; 17-6; 19-1; 24-35; 22-33) (27-16; 29-18; 31-13; 36-11; 34-9) (3-28; 5-30; 7-25; 12-23; 10-21)
2	36	6	17	1-13-25	19-31-7	(18-2; 21-3; 20-4; 23-5; 22-36) (30-14); 33-15; 32-16; 35-17; 34-12) (6-28; 11-29; 10-26; 9-27 18-24)
4	12	1	3	1-3-5	10-12-2	(4-7) (6-9) (8-11)
4	24	2	5	1-5-9	19-23-3	(6-12; 7-13; 18-24) (10-16; 11-17; 22-4) (14-20; 15-21; 2-8)
4	24	2	7	1-5-9	19-23-3	(8-14; 7-13; 20-2) (12-18; 11-7; 24-6) (16-22; 15-21; 4-10)
4	36	3	9	1-7-13	12-18-4	(10-2; 29-21; 30-19; 28-20; 11-3) (16-8; 35-27; 36-25; 34-26; (16-8; 35-27; 36-25; 34-26; 17-9) (22-14); 5-33; 6-15; 24-32; 23-31)
4	48	4	11	1-9-17	39-47-5	(12-3; 14-26; 15-24; 18-27; 33-25; 36-48; 37-2) (20-11; 22-34; 23-32; 21-33; 44-35; 46:3; 45-10) (28-19; 30-40; 29-42; 31-41; 4-43; 6-18; 7-16)
6	24	1 1/3	4	6-9-12	10-5-8-	(6-12; 23-19; 15-11; 14-10) (9-13; 17-21; 18-32; 1-1) (12-16; 20-24; 3-7; 4-8)
6	36	2	5	2-5-9	31-35-3	(6-12; 7-13; 18-24; 19-25; 30-38) (10-16; 11-17; 22-23 23-29; 34-4) (14-20; 15-21; 26-32; 27-33; 2-8)

CAPÍTULO XX

BOBINADOS TRIFÁSICOS ONDULADOS O DE BARRAS

Así como en las máquinas de corriente continua tenemos arrollamiento del inducido de tipo imbricado y de tipo ondulado, aplicándose uno u otro según el destino, velocidad y tensión de servicio de la máquina, en los estatores de las de corriente alternada encontramos también los dos tipos de bobinados, aparte de los devanados en cadena vistos en el capítulo XVIII. Los imbricados ya han sido tratados; corresponde pasar a los de tipo ondulado.

Para establecer bien las diferencias entre ellos y sentar la similitud que existe entre iguales tipos de corriente continua y corriente alternada, convendría que el lector consulte los capítulos correspondientes a las máquinas de continua.

Por de pronto, podemos decir que un arrollamiento ondulado es aquel en el cual las distintas espiras están conectadas de modo que se pasa de una a otra avanzando siempre a lo largo de la periferia del inducido o del estator (según se trate de máquinas de continua o de alternada). El tipo imbricado, en cambio, es aquel en que el paso es en avance y en retroceso, alternativamente.

Además, el circuito de una sección del bobinado, en los imbricados, da una sola vuelta completa de la periferia, mientras en los ondulados da dos o más vueltas antes de terminar su recorrido. En el caso de las máquinas de corriente continua habrá tantos circuitos como los nombrados, como ramas en paralelo haya en el bobinado. Para los ondulados, se tienen siempre dos circuitos en paralelo, o dos vías de devanado. En las máquinas de corriente alternada habrá tantos circuitos como fases, y en el caso particular de máquinas trifásicas, el bobinado tendrá tres circuitos, pero no conectados en paralelo, como en el caso de corriente continua, sino en estrella o en triángulo, según se vió en capítulos anteriores.

De modo pues, que desde el punto de vista de la conexión a la red, se tendrán siempre tres bornes de entrada a cada fase del bobinado y tres bornes de salida, que se conectarán a la línea en la forma conocida (ver figura 212). La forma de realizar el devanado en sí, no interesa para la conexión a la red.

Puede haber bobinados ondulados trifásicos con más de tres ramas, debiendo ser el número de las mismas múltiplos de 3 (6, 9, 12, etc.), conectándose en paralelo en grupos, de manera que se tengan tres circuitos de igual número de ramas y bobinas conectadas a la caja de bornes, con sus principios y finales.

En el caso particular de máquinas monofásicas, pueden ser bobinadas con sistemas ondulados de dos o más ramas en paralelo, pero no insistiremos en este detalle por no salir del tema impuesto a este capítulo, limitado al estudio de los devanados trifásicos.

Más adelante veremos que además de las diferencias señaladas con respecto a los devanados ondulados de corriente continua, hay otras, tanto o más importantes que las primeras.

Posibilidad de ejecución

En normas generales, podemos decir que las condiciones son las mismas que para otros tipos de bobinados de corriente alternada, es decir, que el número de ranuras por polo y por fase debe ser un número entero. Para determinar la posibilidad de ejecutar un bobinado de este tipo debe pues, consultarse la tabla dada en el capítulo XVII.

En caso de no cumplirse con lo especificado, se intentará diseñar un devanado a ocupación parcial de ranuras, es decir, dejando algunas vacías, pero ya sabemos que este detalle afecta el rendimiento y costo de la máquina.

Tipos de bobinas

Al hablar de este tema en el capítulo XVII, dijimos que había devanados de bobinas y devanados de barras. Los ondulados son casi siempre de barras, es decir, que cada bobina está formada por un conductor único, macizo o multifilar, al que se le da la forma mediante moldes antes de ser colocado en las ranuras, dejando los extremos libres para hacer las conexiones con las bobinas restantes. En rigor, debería hablarse de espiras y no de bobinas.

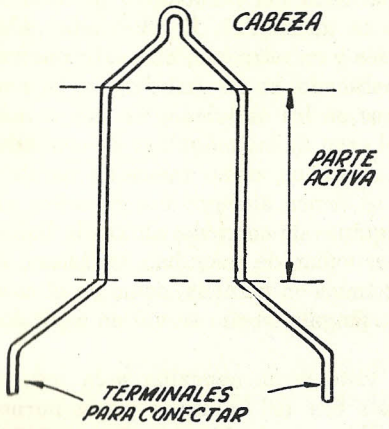

FIG. 220. — Forma de las espiras en los bobinados ondulados.

La figura 220 muestra el aspecto de una espira como las descriptas, las que no son planas, sino que se apoyan sobre una superficie cilíndrica imaginaria con igual diámetro que el estator de la máquina a que están destinadas.

En cada ranura del estator hay generalmente dos lados de bobina, pues los devanados ondulados se hacen casi siempre a

dos capas, pero a veces se los encuentra de una sola capa, con un lado de bobina por ranura. Como la primera disposición es más común, nos ocuparemos entonces de los bobinados ondulados de doble capa, en los cuales el número de bobinas es igual al número de ranuras. Cada ranura tiene dos lados de bobina.

Si se trata de realizar un devanado de una capa, sólo habrá que desarrollar los gráficos que veremos más adelante, imaginando que los dos lados de espira están adjuntos en lugar de encimados. Lo mismo podemos decir de los cuadros, pero en esto debemos advertir que donde se supone colocación superior debe traducirse por ubicación par y las inferiores serán impares.

Principio de ejecución

Para ejecutar un arrollamiento ondulado, se parte del principio de que, en cada instante, los conductores que están simétricamente colocados bajo cada polo, deben estar conectados en serie. En los alternadores, esto significa que las ff.ee.mm. generadas en los mismos estarán en fase, y se sumarán aritméticamente. En los motores y en todos los devanados en general, puede decirse que se deben conectar en serie los conductores que están al mismo potencial instantáneo.

Como en el conductor que está debajo de un polo Norte, por ejemplo, la corriente circula en un sentido determinado y en el que está debajo de un polo Sur, circulará en sentido contrario, las conexiones entre dos conductores que queden debajo de polos contiguos debe hacerse de modo que se invierta la circulación. Para el conductor siguiente de la serie, que estará debajo de otro polo Norte, se debe tener nuevamente el sentido de circulación del primer conductor de la serie. Para que ello sea posible, las uniones entre conductores activos serán hechas una en cada extremo del núcleo, alternativamente. Para la representación plana utilizada para dibujar los bobinados, esto significa que una conexión se hace arriba y la siguiente debajo, y así sucesivamente. Convendría aclarar esto, consultando la teoría de devanados ondulados de corriente continua.

Series de bobinas

Cada serie de bobinas de un devanado ondulado tiene tantas en serie como la mitad del número de polos, con lo que se da una vuelta completa al estator; la segunda serie comienza desde aquí, pero para evitar la superposición sobre las ranuras ya ocupadas, se debe acortar el paso de la primera espira de la segunda serie. Esta es una característica destacada de los devanados ondulados de corriente alternada, que no existía en los de corriente continua. En los ejemplos de ejecución se notará este detalle.

Conexión de inversión

Otra característica de los bobinados ondulados de corriente alternada, es que se forman dos series de recorridos inversos, para tomar en una fase todas las ranuras correspondientes, pues, como en cada ranura hay dos lados de bobina, y en ambos la corriente tiene el mismo sentido, para tener circulación cerrada se debe volver para atrás, en la forma que se ve en la figura 221.

En efecto, en la citada figura hemos numerado 4 ranuras. Los conductores de colocación superior los marcamos llenos (se trata de devanados doble capa, por supuesto) y los de colocación interna o inferior en la ranura, los marcamos punteados. Si entramos con la serie por el conductor superior de la ranura 2, por ejemplo, y pasamos, cumpliendo un paso determinado (en la figura este paso es igual a 1, para simplificar la explicación), al conductor inferior de la ranura 3, de éste al superior de la ranura 4, habremos terminado la serie, pues llegamos al final de las ranuras, y se unirá el superior de la 4 con el inferior de la 1.

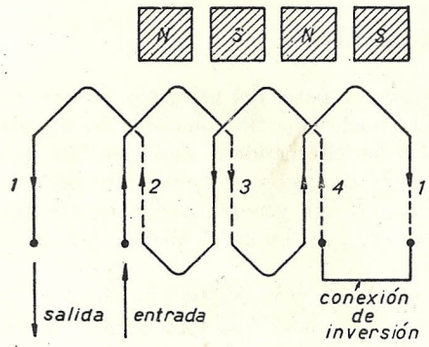

FIG. 221. — Principio de ejecución de un bobinado ondulado.

Pero se nota en seguida que hemos dejado sin conectar los conductores inferiores de las ranuras 2 y 4 y los superiores de las 1 y 3, lo que es ilógico.

Para poder conectar en la serie todos los lados de bobina que hay entre 1 y 4, es decir, los 8 lados de bobina, se procede en la forma siguiente:

Al llegar al conductor inferior de la ranura 1, en lugar de dar por terminada la serie, se pasa al conductor inferior de la ranura 4, con un puente llamado "conexión de inversión", y se comienza a devanar en sentido inverso de avance, es decir, hacia atrás. Se unirá, pues, el inferior de la ranura 4 con el superior de la 3, éste, con el inferior de la 2 y finalmente llegamos al superior de la ranura 1, que constituye el fin de la serie y salida al exterior.

Se han ocupado ahora todos los conductores, y si se sigue el sentido de las flechas, se verá que las corrientes tienen circulación cerrada, para lo cual hemos indicado como de costumbre con flechas ascendentes las corrientes debajo de los polos Norte y descendentes debajo de los Sur. Como se ve, se trata de una máquina de cuatro polos. No se hacen normalmente bobinados ondulados para las de dos polos.

Las conexiones de inversión se hacen a razón de una por fase, y siempre entre dos conductores que están colocados en la parte interior de la ranura. En cada caso se indicará cuál debe ser el puente a hacer.

Reglas prácticas

Resumiremos ahora parte de lo dicho, completándolo con algunas condiciones que se cumplen en todos los bobinados ondulados de doble capa en las máquinas de corriente alternada.

Por de pronto, se dijo que el número de bobinas de una serie que abarca la periferia total del estator, era igual al número de polos divididos por 2. Agregaremos ahora que el número de series es igual al número de ranuras por polo y por fase.

Cada fase tiene dos series completas, una en un sentido y otra en el otro, unidas entre sí por las conexiones de inversión, ya explicadas. En una máquina trifásica habrá pues, siempre 3 conexiones de inversión.

Dijimos que algunas espiras tenían un paso más corto que el de las demás. La cantidad de espiras que tendrá paso más corto es igual a:

$$N^{o} \text{ de ranuras por polo y fase} - 1$$

una unidad menos que el número de ranuras por polo y fase.

La entrada y salida de cada fase estarán siempre en conductores de colocación superior en las ranuras, o, invirtiendo todo el bobinado, estarán siempre en conductores inferiores. Es más común lo primero, de modo que en las tablas de bobinado consideraremos las entradas y salidas de fase unidas a conductores superiores.

EJEMPLOS DE TRAZADO DE BOBINADOS ONDULADOS

Con las consideraciones que preceden, se pueden dibujar algunos esquemas de bobinados para servir de modelos de ejecución. Para simplificar la interpretación al lector, se elegirán estatores con números reducidos de ranuras.

Aunque los devanados ondulados se usan especialmente para máquinas de gran potencia y número de polos, consideraremos ejemplos con cuatro y seis polos, pues no habrá dificultad en el diseño de los más complejos, observando las recomendaciones de las tablas de bobinados, que para los ondulados son más indispensables que para los imbricados por la existencia de pasos reducidos y conexiones de inversión.

Bobinado ondulado para máquina de cuatro polos

La figura 222 muestra una parte de un devanado como el propuesto, habiéndose trazado sólo los circuitos correspondientes a las fases 1 y 2 para simplificar el dibujo. La fase 3 queda sin unir los conductores, pero su trazado es exactamente igual al correspondiente a las otras dos. La fase 1 se dibuja con línea llena y la 2 con punteada.

Como se trata de un devanado de cuatro polos, el paso normal es de seis

ranuras y el paso corto, de 5 ranuras. El cálculo del paso es similar a los ejemplos dados para otros tipos de bobinados, de modo que no insistiremos sobre el particular.

La entrada de la fase 1 está en el conductor superior de la ranura 1, y de aquí cumplimos el paso 6, conectando alternativamente un conductor superior con uno inferior y así siguiendo, hasta llegar al conductor inferior de la

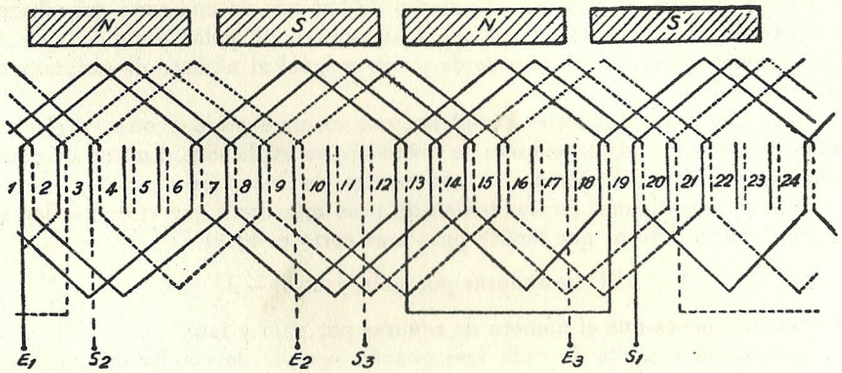

FIG. 222. — Bobinado ondulado de cuatro polos.

ranura 18, siendo el último paso igual a 5. En el conductor citado hay que hacer la conexión de inversión, pasando entonces al inferior de la ranura 12, pues ella tiene un paso normal hacia atrás.

De aquí comienza la serie inversa hasta llegar al conductor superior de la ranura 19, que es el de salida de la fase 1.

La fase 2 se traza en forma similar, teniendo la conexión de inversión entre las ranuras 20 y 2 en sus conductores inferiores. El paso corto se cumple entre las ranuras 3 y 8 y entre las 21 y 2. Esto quedará explicado en la tabla de bobinados más adelante.

La fase 3 queda sin trazar, pero si se deseara completar el bobinado, la conexión de inversión de la misma se hace entre los conductores inferiores de las ranuras 4 y 10, y los pasos cortos entre las 11-16 y 5-10.

Bobinado ondulado para máquina de seis polos

El número mínimo de ranuras para que sea posible un devanado de seis polos a ocupación total de ranuras, es 18, por lo que adoptamos esa cantidad. La figura 223 muestra el resultado.

En un bobinado de este tipo, con 18 ranuras no se presentan espiras de paso corto, pero sí tendremos las conocidas conexiones de inversión, que se hacen entre los conductores inferiores de las ranuras 13 y 16 para la fase 1; 17 y 2 para la fase 2 y (3-6) para la fase 3.

Las entradas de cada fase están indicadas en la figura 223, lo mismo que

las salidas, y el paso normal del bobinado es 3, como corresponde a un estator de 18 ranuras y seis polos, pues está dado por el cociente entre esas dos cantidades.

También en este ejemplo hemos trazado con línea llena el bobinado de la fase 1 y con línea punteada el de la fase 2, dejando la fase 3 sin conectar,

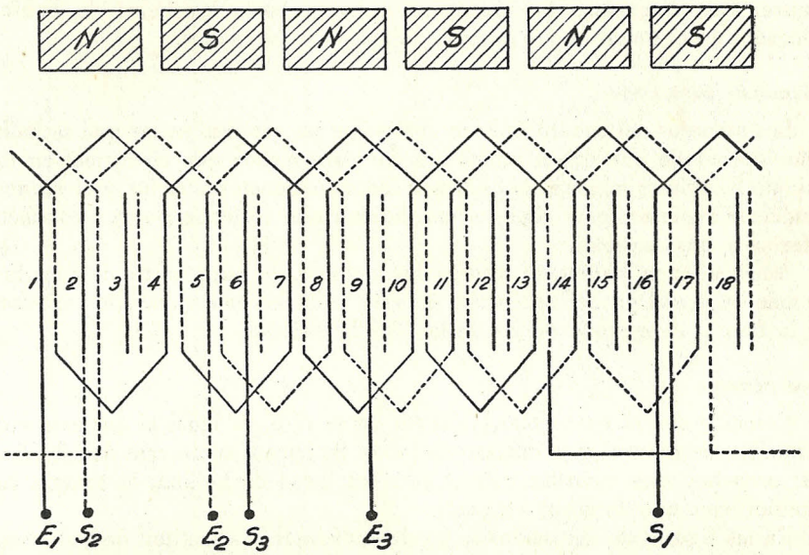

FIG. 223. — Bobinado ondulado de seis polos.

por razones de claridad en el dibujo. Ella es perfectamente idéntica a las otras dos, de modo que puede completarse el esquema sin ninguna dificultad.

TABLAS DE BOBINADOS ONDULADOS

Por de pronto, aclararemos que se refieren a los devanados en doble capa, en los que cada ranura aloja dos lados de bobina, uno inferior, que es el que está colocado en el fondo de la ranura y otro superior, que está encima del anterior.

Las tablas dan el número de polos, de ranuras, el paso polar o sea normal de bobinado, las entradas y salidas de cada fase y las conexiones de inversión. Además se indica cuáles son los conductores unidos con paso corto de una ranura menos que el normal.

Conviene hacer las siguientes aclaraciones a las tablas:

Entradas y salidas de fases.

En la tabla se indica un número; él corresponde al número de orden de la ranura, pero como en toda ranura hay dos conductores, queda sobreentendido

que las entradas y salidas de fase se unen siempre a los conductores superiores de la ranura respectiva.

Pasos de bobinado.

También en este caso se indica un número; él corresponde al orden de colocación de la ranura, pero siempre se refiere al conductor inferior de dicha ranura. Las conexiones de inversión se hacen entre los lados de bobinas colocados en el fondo de las ranuras indicadas en el cuadro.

Bobinas de paso corto.

Los números del cuadro indican cuáles son las ranuras en las que se hallan lados de bobina que deben unirse con un paso menor que el normal en una unidad. El primer número de cada par indica conductor inferior y el segundo conductor superior, pues siempre una bobina está formada por un conductor inferior y uno superior.

Además, cada paréntesis agrupa las bobinas de paso corto de una fase, de manera que el primer paréntesis encierra todas las conexiones de paso corto de la fase 1, el segundo de las de la fase 2, etcétera.

Paso normal.

Coincide con el paso polar, y, como ya se dijo, es igual al cociente entre el número de ranuras y el número de polos. Se cuenta como cantidad de ranuras, pero hay que recordar que al unir los lados de bobina, se tomará uno superior con uno inferior, etcétera.

En las figuras de devanados se puede confirmar la exactitud de los pasos y confrontar con los que da la tabla de bobinados.

Número de ranuras.

Queda sentado que los números de ranuras que figuran en la tabla son los que permiten trazar un devanado a ocupación total de las mismas, en concordancia con el número de polos.

Para mayores detalles, obsérvese la tabla citada, en la que aparecen los casos más frecuentes en la práctica. Para estatores de mayor número de ranuras que los que se encuentran en ella, se procede en idéntica forma, siguiendo el criterio general expuesto.

Se observará que las cantidades de ranuras siguen una ley aritmética definida; por de pronto son divisibles por 3, ya que se deberán hacer bobinados trifásicos, y además, los números de esta tabla están de acuerdo con la otra dada en el capítulo XVII, para ocupación total de ranuras, ya que es ilógico que en un proyecto de devanado no se tome en cuenta tal detalle.

Pasamos finalmente a la tabla de bobinados ondulados en doble capa, que abarca estatores desde 24 hasta 72 ranuras, que son los más comunes en la práctica. Las explicaciones anteriores permitirán interpretar cabalmente todos los datos que figuran en la tabla, los que lógicamente están sintetizados.

Tabla de bobinados ondulados en doble capa

Nº de polos	Nº de ranuras	Paso normal	Entradas de fases	Salidas de fases	Conexiones de inversión	Conexiones de bobinas de paso corto
4	24	6	1-9-17	19-3-11	12-18 20-2 4-10	(19-24; 13-18) (3-8; 21-2) (11-56; 5-10)
4	36	9	1-13-25	28-4-16	17-26 29-2 5-14	(27-35; 28-36; 18-26; 19-27) (3-11; 4-12; 30-2; 31-3) (15-23; 16-24; 6-14; 7-15)
4	48	12	1-17-33	37-5-21	22-34 38-2 6-18	(35-46; 37-48; 23-34; 25-36) (3-14; 5-16; 39-2; 41-4) (19-30; 21-32; 7-18; 9-20)
4	60	15	1-21-41	46-6-26	27-42 47-2 7-22	(43-57; 46-60; 28-42; 31-45) (3-17; 6-20; 48-2; 51-5) (23-37; 26-40; 8-12; 11-25)
4	72	18	1-25-49	55-7-31	32-50 56-2 8-26	(51-68; 55-72; 33-50; 37-54) (3-20; 7-24; 57-2; 61-6) (27-44; 31-48; 9-26; 13-30)
6	18	3	1-5-9	16-2-6	13-16 17-2 3-6	No hay „ „ „ „
6	36	6	1-9-17	31-3-11	24-30 32-2 4-10	(31-36; 25-30) (3-8; 32-2) (11-16; 5-10)
6	54	9	1-13-25	46-4-16	35-44 47-2 5-14	(45-53; 46-54; 36-44; 37-45) (3-11; 4-12; 46-2; 49-3) (15-23; 16-24; 6-14; 7-15)
6	72	12	1-17-33	61-5-21	46-58 62-2 6-18	(59-70; 61-72; 47-60; 49-60) (3-14; 5-16; 63-2; 65-4) (19-30; 21-32; 7-18; 9-20)
8	24	3	1-5-9	22-2-6	19-22 23-2 3-6	No hay „ „ „ „
8	48	6	1-9-17	43-3-11	36-42 44-2 4-10	(43-48; 37-42) (3-8; 45-2) (11-16; 5-10)
8	72	9	1-13-25	63-4-16	53-62 65-2 5-14	(63-71; 64-72; 54-62; 55-63) (3-11; 4-12; 66-2; 67-3) (15-23; 16-24; 6-14; 7-15)
10	30	3	1-5-9	28-2-6	25-28 29-2 3-6	No hay „ „ „ „

Nº de polos	Nº de ranuras	Paso normal	Entradas de fases	Salidas de fases	Conexiones de inversión	Conexiones de bobinas de paso corto
10	60	6	1-9-17	55-3-11	48-54 56-2 4-10	(55-60; 49-54) (3-8; 57-2) (11-16; 5-10)
10	90	9	1-13-25	82-4-6	71-80 83-2 5-14	(81-89; 82-90; 72-80; 73-81) (3-11; 4-12; 84-2; 85-3) (15-23; 16-24; 6-14; 7-15)
12	36	3	1-5-9	34-2-6	31-34 35-2 3-6	No hay " " " "
12	72	6	1-9-17	67-3-11	60-66 68-2 4-10	(67-72; 61-66) (3-8; 69-2), ; (11-16; 5-10)

CAPÍTULO XXI

BOBINADOS TRIFÁSICOS FRACCIONARIOS Y CON RANURAS VACÍAS

En los bobinados para corriente alternada trifásica vistos hasta aquí, siempre se cumplía una condición que parecía esencial, y es que el número de ranuras por polo y fase era un número entero. Si escribimos la condición mencionada para los casos en que no se cumple la misma, pondremos:

$$\text{ranuras por polo y fase, } g = \frac{N}{3\,p} = \text{fraccionario}$$

es decir que si llamamos *g* al número de ranuras por polo y fase, ese número se calcula dividiendo el número total de ranuras por el producto del número de fases por el de polos. Si resulta un número entero, estamos en los casos tratados en capítulos anteriores; si resulta fraccionario, estamos entre los casos que consideraremos en esta oportunidad.

Los bobinados que se realizan con número fraccionario de ranuras por polo y fase se denominan en forma general: *bobinados fraccionarios* y su trazado escapa un poco a las reglas vistas anteriormente. Por lo tanto anotamos que a diferencia de los otros, tienen los grupos de bobinas de cada fase decalados o desplazados entre sí, lo que puede representar una ventaja para la forma de onda en el campo magnético de la periferia del estator.

Desde luego no se puede ejecutar un bobinado con cualquier número de ranuras, pues inclusive hay casos en que el trazado sólo se puede hacer dejando algunas ranuras vacías, como veremos más adelante en este mismo capítulo. Si un bobinado debe ser trifásico, por lo pronto necesitamos que haya un número de ranuras múltiplo de 3. En otras palabras, deben poder formarse tres secciones iguales de bobinado, y repartidas simétricamente en la periferia del estator. Pero, cada sección o fase del bobinado tiene bobinas, y cada bobina tiene dos lados que se ubican en distintas ranuras, de manera que debe haber una condición de posibilidad, y es que el número de lados de bobina por fase debe ser un número entero.

Además, si escribimos la condición anterior en relación con los datos de la máquina, podemos llamar *h* al número de bobinas por fase, que vale:

$$\text{bobinas por fase: } h = \frac{N}{2 \times 3} = \frac{N}{6} = \text{entero}$$

Y hemos puesto 2×3 en el denominador, porque tenemos tres fases y cada bobina necesita dos ranuras para ubicarse, de modo que el total de ranuras N debe dividirse por 2 y por 3.

Ahora bien, un número entero puede ser par o impar, y *h* puede dar cualquiera de esas dos posibilidades. Entonces distinguiremos en los bobinados fraccionarios el detalle de que el número de bobinas por fase sea *par* o sea *impar*. Se presentan así dos casos distintos que veremos por separado.

Bobinados fraccionarios con número par de bobinas por fase

Cuando el número de bobinas por fase es par, el trazado del bobinado se simplifica, y se pueden establecer algunas reglas básicas. Por supuesto que cada fase tiene que tener el mismo número de bobinas para cumplir simetría de tensiones. Se establece una condición de posibilidad y es que entre el número de ranuras y el de polos haya una relación determinada, que se expresa así:

$$\frac{2\,h}{M_d} = \text{entero}$$

En esta expresión, *h* es el número de bobinas por fase, que ya conocemos, y M_d es el máximo común divisor entre el número de ranuras N y la mitad del número de polos del bobinado. Veamos un ejemplo para entender la aplicación de la condición de posibilidad:

Sea un estator con 48 ranuras para un bobinado trifásico de 10 polos. El número de ranuras por polo y fase vale:

$$g = \frac{N}{3\,p} = \frac{48}{3 \times 10} = 1{,}6 \text{ (fraccionario)}$$

El número de bobinas por fase vale

$$h = \frac{N}{6} = \frac{48}{6} = 8 \text{ (par)}$$

Tenemos que calcular el máximo común divisor entre 48 ranuras y 5, que es la mitad del número de polos. Ese máximo común divisor es la unidad de modo que la condición de posibilidad da:

$$\frac{2\,h}{M_d} = \frac{2 \times 8}{1} = 16 \text{ (entero)}$$

luego el bobinado puede ejecutarse, y se trata de un bobinado fraccionario con un número par de bobinas por fase. En general M_d da la unidad para este tipo de bobinado, o sea que N y ½ p son primos entre sí.

Fijaremos ahora lo que se llama en estos tipos de bobinados, el *paso de bobinas*, es decir la cantidad de ranuras que media entre los comienzos de bobinas de una misma fase. Ese paso se calcula con la expresión:

$$y_b = k\,\frac{N \pm 1}{\frac{1}{2}\,p}$$

es decir, sumando o restando una unidad al número de ranuras, y multiplicando por un coeficiente *k* que es cualquier número entero lo menor posible que convenga, y dividiendo por la mitad del número de polos. Este paso de bobinas permite marcar en el trazado los comienzos de cada sección del bobinado de una fase, y por simetría resultan inmediatamente los correspondientes a las otras fases. Las consideraciones que anteceden valen para bobinados fraccionarios con secciones en serie o en paralelo, indistintamente, pues sabemos que la diferencia entre estos dos tipos se notan en las conexiones frontales, según se ha visto en capítulos anteriores. Con un ejemplo trazado aclararemos mejor lo dicho y se podrán resolver los casos similares que se presenten en la práctica.

Ejemplo numérico.

Trataremos un caso práctico cualquiera para mostrar cómo se resuelven en la práctica los trazados de bobinados fraccionarios con número par de bobinas por fase. Sea una máquina de 24 ranuras en el estator y 10 polos, o sea que corresponde a una velocidad de 600 r. p. m. Se debe hacer un bobinado trifásico, y el número de ranuras por polo y fase:

$$g = \frac{N}{3\,p} = \frac{24}{3 \times 10} = 0{,}8 \text{ (fraccionario)}$$

nos dice que no podrá ser un bobinado común en cadena o imbricado, sino que se debe proyectar un bobinado fraccionario. Veamos la cantidad de bobinas por fase:

$$h = \frac{N}{6} = \frac{24}{6} = 4 \text{ (entero y par)}$$

es decir que el bobinado puede hacerse, por ser *h* un número entero, y que por ser par, estamos en la categoría que corresponde a este subtítulo.

Calculemos el paso de bobinas, para lo cual tomamos la fórmula vista en la que el coeficiente *k* podemos hacerlo igual a la unidad:

$$y_b = k\,\frac{N \pm 1}{\frac{1}{2}\,p} = \frac{24 + 1}{5} = 5$$

lo que nos dice que los comienzos de bobinas están separados de 5 ranuras.

Ya podemos trazar el bobinado. Tenemos cuatro bobinas por fase, o sea un total de 12 bobinas, que dibujamos en la figura 224, con dos tamaños diferentes. La fase 1 aparece con línea de trazos, la 2 con línea llena y la 3

con puntos. El paso polar debe ser el cociente entre el número de ranuras y polos, o sea:

$$\frac{N}{p} = \frac{24}{10} = 2{,}4$$

luego tomamos para cada bobina un paso menor que el polar, y precisamente la cantidad entera más próxima, que es 2. La primera bobina la tomamos entre las ranuras 3 y 5, y la segunda bobina de esa misma fase debe abarcar las 8 y 10, pues entre los lados de comienzo debe haber el paso de bobina que era 5 ranuras. Así dibujamos las cuatro bobinas que corresponden a la fase 1. Las entradas de cada fase distan entre sí de 8 ranuras, por razones de simetría trifásica, de modo que en la ranura 11 comenzamos la serie de bobinas de la segunda fase, y en la 19 las de la fase 3. Cada fase tiene su punto de salida

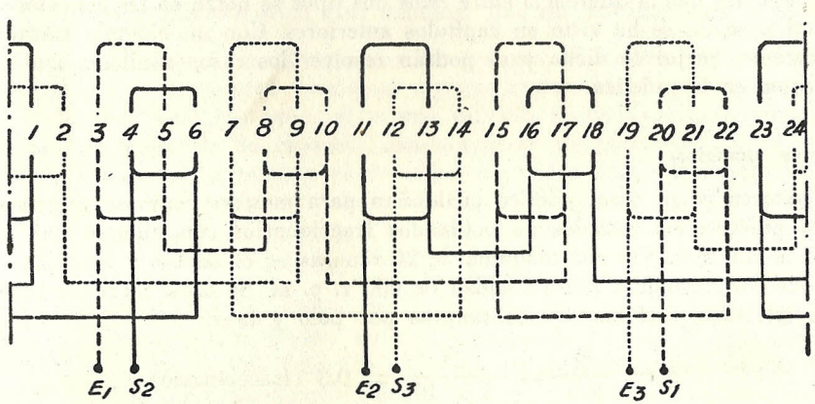

FIG. 224. — Bobinado trifásico fraccionario con secciones en serie en cada fase. Tiene 24 ranuras y 10 polos.

en el lugar que se ve en la figura, y corresponde al fin de cada serie de bobinas de una fase. La interconexión de las tres fases entre sí es cosa ya vista anteriormente, de modo que no insistiremos en ello. Las conexiones frontales resultan automáticamente de hacer las series de bobinas de cada fase, tal como se ve en la figura, y las cabezas de bobinas son en dos planos, teniendo cada fase dos bobinas largas y dos cortas, con lo que la simetría del bobinado es perfecta.

Como puede resultar de interés para los lectores la ejemplificación de un bobinado fraccionario con bobinas en paralelo en lugar de estar en serie como el ejemplo tratado, damos en la figura 225 el mismo bobinado para 24 ranuras y 10 polos, pero con las secciones en paralelo y conexiones en estrella, ya hechas en el bobinaje. A la caja de bornes llegan, pues, sólo tres terminales, que son las entradas de las tres fases, y cuyos puntos repiten los de la figura anterior. La diferencia está en las conexiones frontales que interconectan las bobinas de cada fase entre sí. Los cálcalos de pasos y de condiciones son los mismos de modo que los omitimos para evitar repeticiones. Nótese la barra puente que conecta las tres salidas de fase entre sí.

Bobinados fraccionarios con número impar de bobinas por fase

Muchas veces ocurre, dentro de los bobinados fraccionarios, que el número de bobinas por fase resulta un número entero, pero impar. El bobinado será realizable cuando se cumple la condición que entre el número de ranuras y la mitad del número de polos haya un máximo común divisor igual a 2. Esto puede escribirse:

$$M_d \text{ entre } N \text{ y } \tfrac{1}{2}p \text{ vale } 2$$

Otros bobinados que escapan a esta clasificación son más raros, y deben estudiarse como casos aislados. Los bobinados de este subtítulo, o sea los que

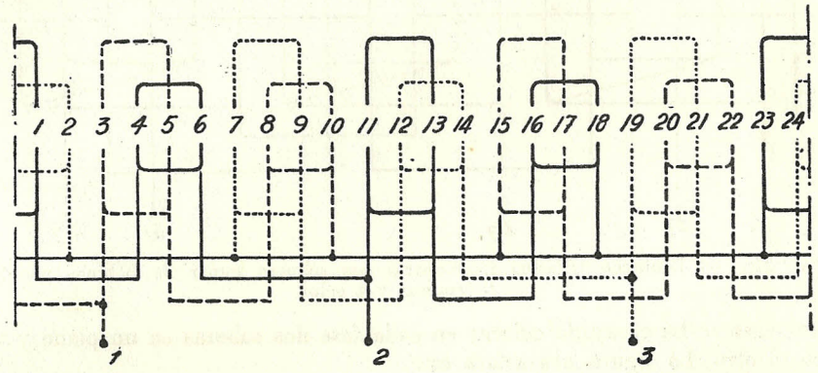

FIG. 225. — Bobinado trifásico fraccionario con secciones en paralelo en cada fase.

tienen *h* impar, sólo se pueden ejecutar con las bobinas de cada fase en serie, pues al no haber cantidad par de bobinas no se pueden formar ramas en paralelo.

Los trazados presentan a veces problemas cuyas soluciones escapan a las reglas simples, de modo que optamos por presentar directamente los ejemplos numéricos, que al servir de modelos, permiten deducir los procedimientos a aplicar en cada caso.

Sea, en primer término, un bobinado para una máquina de 18 ranuras y 4 polos, en la cual tenemos que el número de ranuras por polo y fase vale:

$$g = \frac{N}{3p} = \frac{18}{3 \times 4} = 1{,}5 \text{ (fraccionario)}$$

En consecuencia estamos dentro de un caso de bobinado fraccionario. Veamos el número de bobinas por fase:

$$h = \frac{N}{6} = \frac{18}{6} = 3 \text{ (entero e impar)}$$

Luego debemos tratar a este bobinado como perteneciente al tipo descripto en

este subtítulo. Veamos si se cumple la condición de posibilidad: El máximo común divisor entre N y ½ p debe ser 2:

M_d entre 18 y 2 vale 2

Luego podemos trazar el bobinado, que se ve en la figura 226. Para determinar la cantidad de cabezas de bobina por plano se procede por tanteos, y en

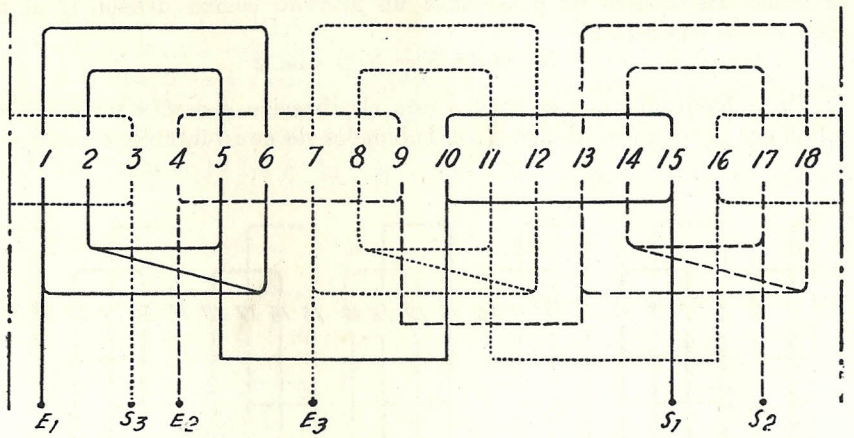

FIG. 226. — Bobinado trifásico fraccionario con número impar de bobinas por fase, 18 ranuras y 4 polos.

este caso se ha ensayado colocar en cada fase dos cabezas en un plano y una en el otro. La figura nos aclara esto.

Pasemos ahora al trazado, que presenta varias posibilidades, pero elegimos la de agrupar simétricamente dos bobinas concéntricas y una separada para cada fase. El paso polar es de:

$$\frac{N}{p} = \frac{18}{4} = 4{,}5$$

luego los pasos del bobinado deben acercarse a esa cifra. Las dos bobinas concéntricas representan un paso medio de 5 ranuras y la separación también tiene paso 5. Esto se repite para cada fase, de modo que si comenzamos con la primera fase, hacemos las dos bobinas concéntricas con los pares de ranuras 1-6 y 2-5. La segunda bobina debe comenzar a una distancia igual a dos pasos polares de la primera, o sea a 9 ranuras, entendiendo por segunda a la que aparece separada, pues las dos primeras son las concéntricas. Comenzamos en la 10 hasta la 15 y tenemos la segunda bobina. Así tenemos las tres bobinas de la fase 1, que, de acuerdo con el enunciado de este tipo de bobinados, deben estar en serie entre sí.

Las otras fases se trazan por similitud, y no ofrecen dificultades, pues se cumple una simetría emanada del cálculo del paso de fase:

$$\frac{2\,N}{3\,p} = \frac{36}{12} = 3 \text{ ranuras}$$

que nos dan las entradas de las otras dos fases. Las salidas se pueden sacar al exterior simplemente conectando los fines de las series de cada fase a la caja de bornes.

Veamos otro ejemplo, que por tener mayor número de polos, puede parecer más complicado. Se trata de una máquina con 30 ranuras y 8 polos. El primer cálculo nos dice que el número de ranuras por polo y fase:

$$g = \frac{30}{24} = 1{,}25 \text{ (fraccionario)}$$

resulta una cantidad fraccionaria, de modo que éste será el tipo de bobinado. Ahora, el número de bobinas por fase vale:

$$h = \frac{30}{6} = 5 \text{ (entero e impar)}$$

lo que nos dice que estamos en el caso de un bobinado con posibilidad de realización dentro de los del tipo de número impar de bobinas por fase, y que todas ellas deben unirse en serie. La posibilidad se comprueba pues entre el número de ranuras 30 y la mitad del de polos 4 el máximo común divisor es 2.

Tenemos 5 bobinas por fase, de las que haremos dos concéntricas y tres

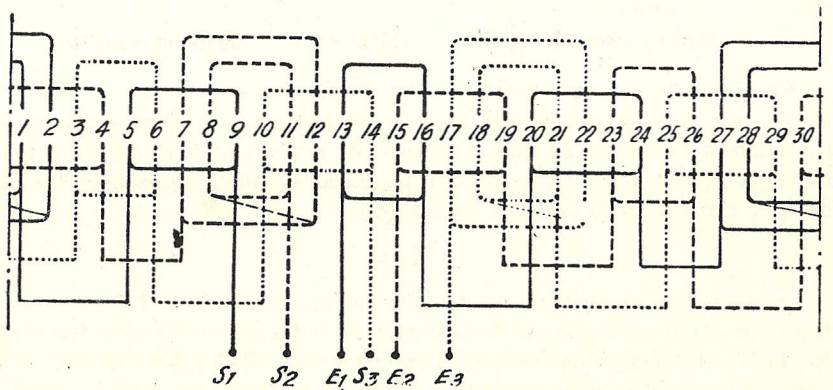

FIG. 227. — Bobinado trifásico fraccionario con número impar de bobinas por fase, 30 ranuras y 8 polos.

apartadas. El ensayo realizado en la figura 227 nos muestra la solución encontrada, en la que se han marcado las entradas y salidas de fase y se ha cumplido un paso de bobinado de 4, como cifra media, que es la cifra más aproximada al paso polar, que es en esta máquina de

3,75 ranuras.

En las bobinas concéntricas el número 4 es el promedio de las dos bobinas y en las apartadas es exactamente el paso tomado. Las conexiones frontales resultan automáticamente de la condición de que en estos bobinados las secciones deben estar siempre en serie, dentro de cada fase.

Bobinados fraccionarios con ranuras vacías

Hay muchos casos de bobinados fraccionarios que para poder ser trazados requieren el dejar vacías algunas ranuras del estator. Esto no es obra de la improvisación, pues cuando tenemos un estator que debe ser rebobinado por diferentes razones, cuando se cambia una serie de fabricación, en fin, cuando hay que colocar un bobinado que cumpla con una determinada condición, el número de ranuras puede presentar dificultades para calcular el bobinado deseado. Si la solución de dejar ranuras vacías permite el trazado y no se presentan otros inconvenientes, puede considerarse como buena.

La primera condición es que el número de ranuras vacías sea múltiplo entero del número de fases, para que resulte un bobinado simétrico. En el caso de los bobinados trifásicos esto quiere decir que la cantidad de ranuras vacías deberá ser:

3 ó múltiplo de 3.

Tal como lo hicimos anteriormente, clasificaremos los casos que se presentan para facilitar la ejemplificación y mostrar algunos trazados que orienten al lector.

Bobinados de primera clase con 3 ranuras vacías

Consideraremos como primera clase a los similares dentro de los fraccionarios comunes en los que el número de bobinas por fase era par, y que cumplían la condición de que el número de ranuras y la mitad de polos eran números primos entre sí, o sea que no eran divisibles recíprocamente. Dicho de otra manera, eran aquellos en los que:

$$M_q = 1$$

Si tomamos el número de ranuras de un bobinado y le descontamos 3, llegamos a una cifra que nos pone dentro de todas las condiciones tratadas para los bobinados fraccionarios con h entero y par. Todos los cálculos se hacen pues de la manera vista para ellos. Veamos un ejemplo, pues hay que saber cómo se dejan vacías esas 3 ranuras, es decir, en cuáles lugares quedan.

Sea un bobinado para máquina de 27 ranuras y 8 polos, en la que si descontamos 3 ranuras nos quedan 24 y tenemos un bobinado fraccionario realizable. Las tres ranuras vacías deben estar distanciadas simétricamente en la periferia del estator, y precisamente a una distancia entre sí igual a la tercera parte del total de ranuras, por tratarse de una máquina trifásica. Luego habrá 8 ranuras llenas y una vacía por fase, tal como podemos comprobar en la figura 228. Compárese este bobinado con el de la figura 224, pues pertenece a la misma clase, aunque con diferentes datos.

El número de ranuras por polo y fase vale aquí:

$$g = \frac{N}{3\,p} = \frac{24}{3 \times 8} = 1$$

un número entero, cosa muy común en estos bobinados. La cantidad de bobinas por fase resulta:

$$h = \frac{N}{6} = \frac{24}{6} = 4 \text{ (par)}$$

Que por ser par, da la categoría que hemos llamado de primera clase a estos bobinados. Lo que resta es muy simple, pues el paso de fase vale

$$\frac{2\,N}{3\,p} = \frac{48}{24} = 2$$

o sea que entre las entradas de cada fase hay dos ranuras, y lo mismo entre las tres salidas. Las cabezas resultan en dos planos, y se pasan por alto las ranuras vacías asignadas previamente en la forma establecida anteriormente. El bobinado resulta simétrico, pues cada fase tiene bobinas cortas y largas, tal como puede comprobarse en la figura. El paso tomado para el bobinado, atendiendo a que el polar vale:

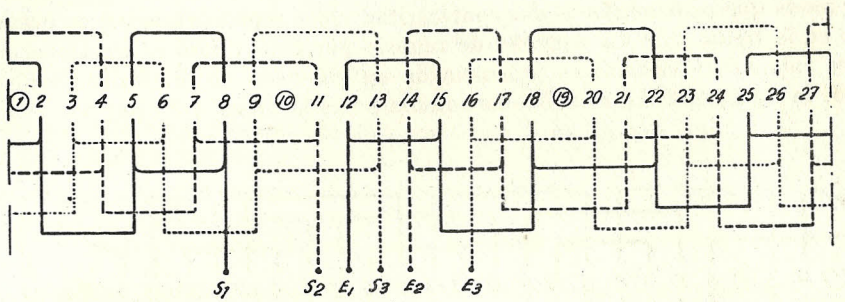

Fig. 228. — Bobinado trifásico a tres ranuras vacías, 27 ranuras y 8 polos.

$$\frac{N}{p} = \frac{24}{8} = 3$$

se ha tomado igual a 3, pero no contando las ranuras vacías.

Bobinados de segunda clase con 3 ranuras vacías

Llamamos bobinados de segunda clase a los que el máximo común divisor entre la cantidad de ranuras y la mitad de polos es mayor que la unidad. En general podemos decir que estos bobinados se presentan para números de polos cuya mitad no es múltiplo de 2, y el caso más común es para 6 polos, que en general presenta dificultades para realizar bobinados sin dejar ranuras vacías. Además, estos bobinados no permiten, en general, formar ramas en paralelo, de modo que las secciones o bobinas de cada fase estarán en serie entre sí.

Veremos también que las 3 ranuras vacías pueden no estar simétricamente

distribuídas en la periferia del estator, pues basta con que cada una esté dentro de cada fase. Como ejemplo, haremos un bobinado para máquina de 27 ranuras y 6 polos, pero con dos trazados distintos: uno en cadena y otro imbricado, a los efectos de notar las diferencias en el diseño.

El paso de fase lo podemos determinar de inmediato:

$$\frac{2\,N}{3\,p} = \frac{2 \times 27}{3 \times 6} = 3$$

Luego, establecemos que entre las tres entradas de fase debe haber 3 ranuras, y esta distancia la adoptamos también entre las ranuras vacías. La cantidad de bobinas por fase es:

$$h = \frac{N}{6} = \frac{24}{6} = 4$$

De modo que distribuiremos dos concéntricas y dos separadas, según se puede ver en la figura 229. La cantidad de ranuras por polo y fase es fraccionaria, pues vale 1,5, y estamos en presencia de un bobinado de la familia similar al de la figura 226. La solución encontrada no es la única, pero una vez colo-

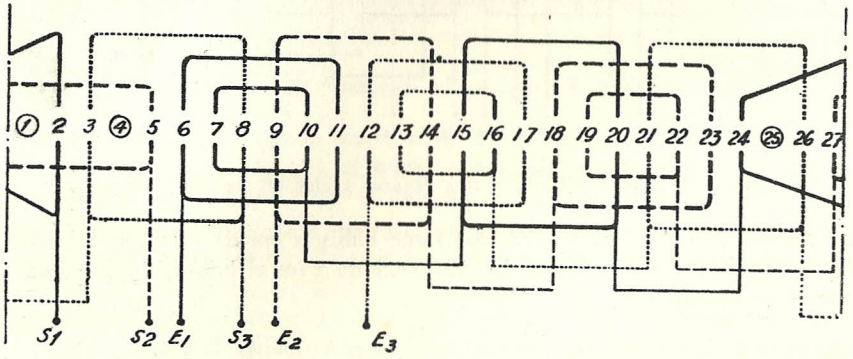

Fig. 229. — Bobinado trifásico a tres ranuras vacías, con 27 ranuras y 6 polos. Resulta un número fraccionario de ranuras por polo y fase.

cados dos lados de bobina, marcados los pasos de fase y el paso de bobinado, que debe ser próximo al paso polar, que valía en nuestro caso 4,5, hemos tomado entonces la cantidad 5 como paso para las bobinas, pero con la salvedad que en las dos concéntricas la cantidad 5 valió para la externa.

Las cabezas han resultado en tres planos, y se ve que en una fase hay una bobina trapecial. Claro que a otras soluciones corresponderá diferente apariencia geométrica del trazado.

Y ahora, tal como lo anunciamos al comienzo del subtítulo, haremos el trazado de este mismo bobinado pero con el sistema imbricado o de bobinas iguales. En realidad, en cuanto estudiemos la figura 230 que da el bobinado terminado, veremos que tiene diferencias con los tipos clásicos vistos en el capítulo XIX.

La cantidad de ranuras vacías, el paso de fase y entre ellas, y los pasos son los mismos, pero la diferencia es que no hay bobinas concéntricas y en

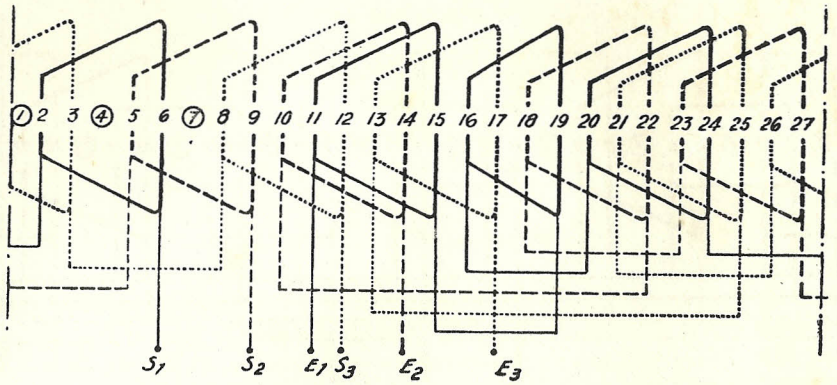

Fig. 230. — Bobinado trifásico imbricado con 3 ranuras vacías, para máquina de 6 polos.

diferentes planos de cabezas. Los pasos tomados son 4 y 5 ranuras, pues hay bobinas de diferente ancho en cada fase.

Bobinados con más de 3 ranuras vacías

Hay muchos casos de bobinados que se trazan por comparación con otros más simples, aplicando un factor fijo a todos los coeficientes. Por ejemplo, la cantidad de ranuras vacías puede ser un múltiplo del número de pares de polos, o sea de ½ p, y más precisamente, se puede trazar un bobinado fraccionario usando una cantidad.

$$\frac{3\,p}{2} \text{ ranuras vacías}$$

Es decir que para 4 polos habrá 6 vacías, para 6 polos habrá 9, etc.

Estos bobinados pueden considerarse como "múltiplos" de los simples pues forman grupos perfectamente equivalentes, los que pueden ser conectados en serie o en paralelo. Cuando del estudio de un bobinado fraccionario resulta que se puede trazar con 3 ranuras vacías, seguramente se podrá encontrar la manera de trazarlo con la cantidad antes mencionada.

Por ejemplo, en la figura 231 podemos ver un bobinado para un estator de 27 ranuras, con 6 polos, el cual ha sido trazado dejando

$$\frac{3\,p}{2} = \frac{3 \times 6}{2} = 9$$

ranuras vacías, y ha cerrado perfectamente. Para diferenciarlo de otros ejemplos ya vistos, aquí se han conectado las ramas de cada fase en paralelo.

El paso polar era en este caso 4,5, y se tomó entonces para el paso de

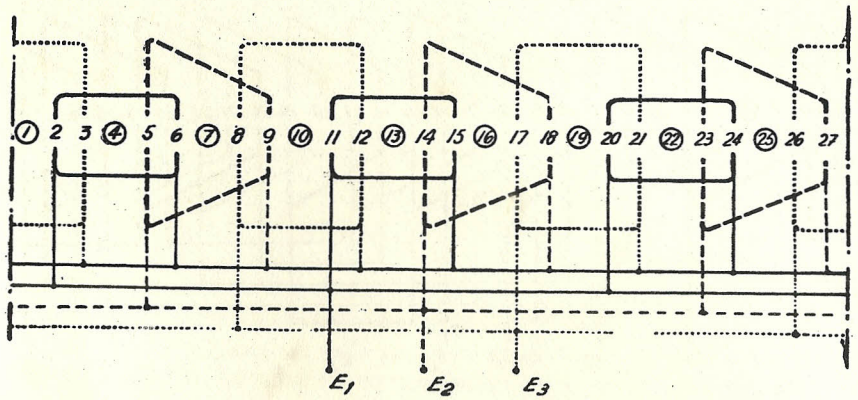

FIG. 231. — Bobinado trifásico con 9 ranuras vacías para una máquina de 6 polos.

bobinado la cantidad de 4 ranuras, resultando todas las bobinas iguales, pero diferentes las formas y dimensiones en cada fase. Si comparamos este trazado con el de la figura 229, se verá en seguida que simplemente se han omitido las bobinas 7-10, la 13-16 y la 19-22.

CAPÍTULO XXII

BOBINADOS DEL ROTOR

En los capítulos V al VII en que se describieron las partes componentes de las máquinas eléctricas de corriente alternada, vimos que las mismas estaban formadas por dos partes fundamentales: el estator y el rotor. En capítulos siguientes nos hemos ocupado del devanado del estator, el que, salvo diferencias constructivas, tenía aspecto similar para todas las máquinas sincrónicas y asincrónicas.

En lo que respecta al rotor no se puede decir lo mismo, pues el de las sincrónicas es una rueda polar, mientras que, el de las asincrónicas es un inducido que oficia de secundario de un transformador, y la corriente que lo recorre proviene del primario, transferida a él por vía electromagnética. Corresponde pues, diferenciar el estudio de los devanados que se refieran a los rotores de las máquinas sincrónicas de las asincrónicas.

Se impone también la aclaración que hemos supuesto a todas las máquinas sincrónicas, sean generadores (alternadores) o motores, con el inducido en el estator y el inductor girante; ello es lo usual, pero algunas pequeñas máquinas de este tipo, muy pocas por cierto, se encuentran con el inductor fijo y el inducido girante. No nos detendremos a hacer excepciones por tal motivo, y en lo que se sigue se sobreentiende que el rotor de los alternadores y motores sincrónicos está formado por la rueda polar y no por el bobinado inducido.

MÁQUINAS SINCRÓNICAS - RUEDA POLAR

El rotor de estas máquinas ya fué descrito en el capítulo V, de modo que partiremos del conocimiento de su forma y partes componentes, La figura 232 muestra una parte de la rueda polar de un inductor de seis polos.

Se ve el núcleo, las expansiones polares, el eje y el bobinado. Nos interesa esta última parte, es decir, la parte eléctrica de los electroimanes que constituyen cada uno de los polos inductores.

La bobina de cada polo está formada por una serie de vueltas alrededor del núcleo, formando un carrete, cuyo corte se ve en la figura 232. La sección del conductor será suficiente para dejar pasar la corriente de excitación, que es continua, y proviene de la excitatriz o dinamo auxiliar acoplada al mismo eje de la máquina (a veces no).

La característica determinante de cada bobinado es el producto de la corriente que lo recorre y el número de espiras que lo forma, producto que se llama "Amper-vueltas":

$$Av = I N$$

y su número permite determinar la cantidad de líneas de fuerza del campo magnético necesario para cortar las espiras del devanado del estator.

El problema es, en realidad, inverso, pues se parte del conocimiento de la f.e.m. que debe ser inducida en el devanado del estator, para lo cual se necesita un flujo magnético determinado, al que se agregarán las pérdidas magnéticas por dispersión y corrientes parásitas. Dado el flujo, se calcula la cantidad de Amper-vueltas capaces de generarlo, y con esta cifra se adopta un cierto número de espiras y la intensidad de corriente de excitación.

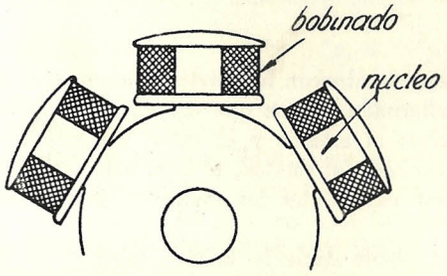

FIG. 232. — Parte del rotor o rueda polar de una máquina sincrónica; puede ser un alternador o un motor sincrónico, indistintamente.

El camino a seguir queda planteado, pero no es sencillo, pues intervienen como factores importantes la permeabilidad del hierro empleado en el núcleo, tanto del estator como de la rueda polar, tratándose, en realidad, de un problema de diseño de máquinas que escapa al tema de esta publicación.

Para el lector que desee entrever el procedimiento, puede ojear la parte correspondiente al inductor del capítulo X. El problema que se le puede presentar al bobinador, es el de rebobinar un campo de una rueda polar, por deterioro de aislación o de sus conductores. Es difícil que la falla alcance a todos los campos, y en tal caso, más difícil aun que aquélla sea de tal magnitud que no pueda verificarse la cantidad de espiras que lleva cada campo, y la sección del conductor empleado.

En esta forma, por comparación con los campos existentes, se transforma un problema de diseño en otro de adaptación de modelos disponibles, debiendo reproducir un bobinado igual al original. Resumiendo, se necesitan conocer dos factores característicos: la sección del conductor y el número de espiras. Los datos restantes son simples, como por ejemplo la aislación adecuada, la forma de conectarlo con los campos restantes, etc.

Para determinar la sección de conductor a emplear se ayuda con un palmer, que da el diámetro del alambre de cobre empleado y resuelve una de las dos incógnitas. La segunda no es tan sencilla.

Para conocer el número de espiras de una bobina construída, se puede proceder en varias formas: por recuento directo, por apreciación y por pesada.

El sistema por recuento que indudablcmente no tiene nada de científico, consiste en desarrollar la bobina contando cada vuelta. Se puede emplear donde el número de ellas es reducido, donde la bobina deba ser desenvuelta para aprovechar el alambre para otros usos, y donde el alambre tenga aun continuidad física más o menos completa. En un bobinado quemado, no siempre es posible realizarlo.

El método de apreciación, consiste en contar únicamente las espiras de una capa, para lo cual no es menester desenvolver el bobinado, y apreciar el número de capas que contenga. El producto del número de espiras por capa, por el número de capas, da el número total de espiras de la bobina.

El tercer método, consiste en pesar una bobina terminada, y emplear en la nueva igual peso del mismo tipo de alambre. Queda sobreentendido que se debe pesar únicamente la bobina, sin núcleo ni partes anexas.

MOTORES ASINCRÓNICOS O DE INDUCCIÓN

Los rotores de los motores de inducción constituyen en realidad, el secundario de un transformador, que se diferencia de los transformadores comunes en que es giratorio. La corriente que circula por él es inducida por el primario, por vía electromagnética.

La desventaja del motor con respecto al transformador está en que, en el primero, hay un entrehierro que aumenta considerablemente la reluctancia del circuito magnético, por lo que se trata de reducirlo a un mínimo compatible con la necesidad de que no se produzca roce con el estator. Otra diferencia característica es que en los transformadores no se habla de polos, mientras que en los motores, a fin de obtener distintas velocidades de giro, se da a sus estatores bobinados de distinto número de polos, como se vió en capítulos anteriores. Las corrientes en el rotor no tendrán un sentido de circulación continuo, como en el secundario de un transformador (en cada fase, se entiende), sino que ellas tendrán sentidos que dependen de la polaridad magnética del punto del estator debajo del cual se hallen en ese momento.

Constructivamnte, los rotores de estos motores se dividen en dos fases: los de "jaula de ardilla" y los bobinados. Los primeros se utilizan para potencias reducidas, por las razones que veremos en seguida, y los segundos, con bobinado, se dotan de anillos con escobillas rozantes, a fin de intercalar en serie con cada fase del bobinado resistencias variables para la maniobra de arranque.

Vimos en el capítulo VI que el campo magnético del estator es giratorio, por lo que cuando el rotor está detenido (momento de conectarlo a la línea), las líneas de fuerza barrerán los conductores del rotor e inducirán una f.e.m. de valor grande, que motivará una corriente de gran intensidad, por lo que la corriente en el primario o estator será mucho mayor que la normal. En los motores de pequeña potencia, esto no es un problema serio para la línea,

pero en los de potencia mayor hay que limitarla a valores compatibles con la sección de los conductores de la red.

Se recurre a procedimientos que limitan la corriente de arranque, los que se aplican al estator (transformador o resistencias de arranque) o al rotor (resistencias de rotor). Los procedimientos sobre el rotor son muy comunes, y consisten en intercalar en serie con cada fase del bobinado del rotor una resistencia variable, que se elimina gradualmente a mano o automáticamente. Para ello es necesario que el rotor tenga bobinado, pues en el sistema a jaula no hay conexiones disponibles desde el exterior.

Algunos motores de jaula tienen dos de ellas, una de hierro y otra de cobre, colocadas concéntricas, para reducir la corriente de arranque. En la descripción siguiente nos ocuparemos de los rotores de jaula única y de los bobinados.

Rotores a jaula de ardilla

Están formados por una serie de barras conductoras macizas, colocadas paralelas entre sí, y unidas por las cabezas mediante dos aros conductores que las ponen en cortocircuito.

Comúnmente, la jaula presenta el aspecto de la figura 233, y cada barra se aloja en una ranura del núcleo del rotor. El núcleo es de hierro, para cerrar el circuito magnético del estator. La construcción de motores en serie obligó a abaratar el costo, por lo que se construyeron las jaulas de aluminio, fundiendo e inyectándolo a presión en el rotor ranurado. Las barras y los aros se forman automáticamente de una sola pieza, y aun se moldean las aletas del ventilador, como se vió en el capítulo VII. Las ranuras tienen cierta inclinación con respecto a la dirección del eje, según se ve en la figura 127.

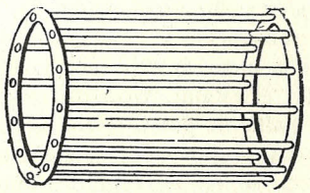

FIG. 233. — Parte eléctrica de un rotor a jaula de ardilla para motores de inducción. Comprende las barras conductoras y los aros frontales.

Desde el punto de vista del funcionamiento, el rotor a jaula se comporta impecablemente. La corriente debajo de cada polo del estator tiene el sentido que corresponde, siendo éste contrario en el Norte con respecto al Sur, y derivándose las corrientes en los aros de cortocircuito. De ellos podemos decir que su sección es mayor cuando menor sea el número de polos, pues al reducirse este último aumenta el número de derivaciones de corriente y se prolongan los recorridos. La sección de los aros de cierre debe ser pues, grande para máquinas bipolares, y se puede reducir a medida que pasamos a las multipolares.

Lo dicho queda justificado si se observa la figura 234. La parte superior representa un motor bipolar (3000 r.p.m.) con rotor a jaula, desarrollado, en el que pueden verse los sentidos de corriente en las barras de la jaula y en los aros de cierre. La parte inferior muestra el desarrollo de un motor de cuatro polos (1500 r.p.m.), observándose inmediatamente que los aros

están mejor aprovechados, las corrientes de circulación no se superponen y los recorridos de las mismas se acortan.

La ilustración corresponde a un instante determinado del ciclo de la corriente alternada de alimentación del motor; medio ciclo más tarde, los sentidos se invierten, pero se mantienen las proporciones de las corrientes en las barras y en los aros de cierre, con la única diferencia que hay que cambiar las flechas de sentido. El caso se repite para motores de mayor número de polos pero la diferencia con respecto al de cuatro no es tan sensible como la que hay entre este último y el bipolar, por lo que se puede colocar un rotor diseñado para una máquina de cuatro polos en una de 6, sin que se produzcan inconvenientes serios. No podemos decir lo mismo si al rotor del motor tetrapolar lo colocamos dentro de un estator bipolar, por las razones expuestas más arriba.

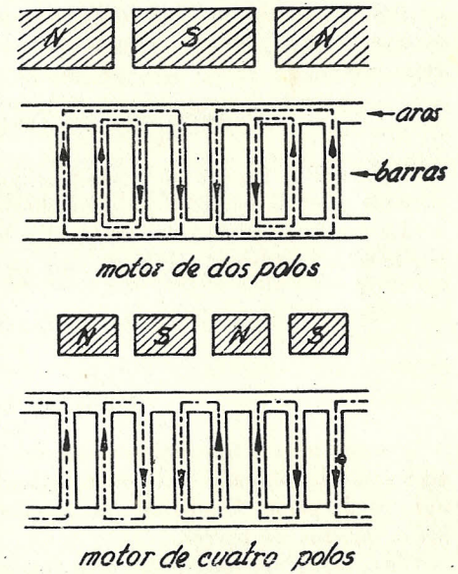

FIG. 234. — Comparación entre las corrientes inducidas en un rotor a jaula según el número de polos.

La formación de polos en la jaula de ardilla es automática, y durante el funcionamiento se formará un campo magnético de igual número de polos que en el estator, coincidiendo también la polaridad magnética en cada instante. Por esta razón, se puede colocar un rotor a jaula dentro de cualquier estator, salvo las circunstancias expresadas más arriba, y funcionará correctamente. La diferencia que se producirá será en el valor de la cupla de arranque que, como depende de la resistencia del rotor, y al variar el número de polos varía el número de barras en paralelo bajo cada polo, será distinto para un rotor determinado al variar el número de polos en el estator.

Rotores bobinados

Aparte de la ventaja de poder reducir la intensidad de corriente de arranque, con el rotor bobinado se consigue poder regular la velocidad durante el funcionamiento. En efecto, agregando resistencias en serie con las bobinas del rotor, se modifica el resbalamiento, y con él la velocidad, aunque dentro de límites no muy amplios, pero suficientes para ciertas aplicaciones prácticas.

Como la corriente en los conductores del rotor es generalmente mayor que en los del estator, la sección de aquéllos será más grande, en proporción adecuada. Hay que aclarar, sin embargo, que la refrigeración es más perfecta

en el rotor que en el estator, por estar aquél en movimiento, de modo que admite mayor densidad de corriente en los conductores.

Se puede determinar el valor de la tensión en cada sección del devanado del rotor, es decir entre cada par de anillos, conociendo la tensión por fase aplicada al estator. Asimismo, conociendo la intensidad por fase en el estator se calcula la corriente por fase en el rotor. Las relaciones que permiten determinar ambas magnitudes, están dadas aproximadamente en función del número de conductores activos del estator y rotor, que pueden ser conocidos.

Así, la tensión por fase del rotor, llamando Z al número de conductores activos de una fase del estator y z, al mismo número correspondiente al rotor, será:

$$\text{Tensión rotor} = \text{Tensión estator} \times \frac{z}{Z}$$

es decir, que la tensión en el rotor es igual a la del estator multiplicada por el cociente entre la cantidad de conductores del rotor y del estator (z/Z).

La corriente en el rotor es igual a la corriente en el estator, multiplicada por la relación inversa a la dada para las tensiones, es decir, aproximadamente:

$$\text{Corriente en el rotor} = \text{Corriente en el estator} \times \frac{Z}{z}$$

Tipos de bobinados

Pueden ser del tipo imbricado o del ondulado. Para rotores pequeños suele utilizarse el bobinado imbricado, sobre todo para los motores de reducido número de polos. A medida que aumenta la potencia, comienzan a utilizarse los devanados de barras.

Para máquinas multipolares, se emplean los arrollamientos ondulados, generalmente a doble capa, con bobinas o con barras, según la potencia en juego.

Bobinados imbricados

Los devanados imbricados para el rotor son similares a los que se emplean en el estator, y se caracterizan por el número de ranuras por polo y fase, el número de lados de bobina por ranura, (simple o doble capa) y el número de espiras de cada bobina.

Es muy común que las fases del bobinado se conecten en triángulo, uniendo sus extremos de a pares a los anillos rozantes, en la forma vista para el estator, con la diferencia que en este caso no existe la caja de bornes, pues los mismos están reemplazados por los anillos.

Durante el funcionamiento normal, las tres fases quedan puestas en cortocircuito, lo que se hace mediante un juego de escobillas en los anillos rozantes.

Para la forma de ejecución del devanado, los cálculos necesarios, y las tablas de puentes frontales a realizar, recomendamos la lectura del capítulo XIX, pues el procedimiento para los devanados del estator y del rotor es similar.

Bobinados ondulados

Se pueden utilizar las fórmulas, gráficos y tablas dadas para los del mismo tipo en el estator, tratados en el capítulo XX. Las entradas de fases están siempre a 120° en los bobinados de rotor, lo que no puede cumplirse exactamente para cualquier número de ranuras.

Como en los bobinados ondulados de estator, los factores característicos son: el número de espiras por polo y por fase, el número de espiras en serie en una vuelta completa, las bobinas de paso normal, igual al polar y las de paso corto, que abarcan una ranura menos que las otras, y, como detalle importante, las conexiones de inversión, vistas en el capítulo XX. Frecuentemente, los bobinados ondulados son de barras, a doble capa, con un lado de espira colocado superiormente y el otro en el fondo de la ranura, correspondiendo entonces a cada ranura dos lados de bobina, o dos barras, pertenecientes claro está, a dos espiras distintas.

Veamos un ejemplo de trazado de bobinado ondulado a doble capa para rotor de un motor trifásico de 4 polos. El rotor tendrá también 4 polos, y como tiene 24 ranuras, se obtienen:

$$\frac{24}{3 \times 4} = 2 \text{ ranuras por polo y fase}$$

El trazado del bobinado resulta con las secciones en serie y las fases en estrella, y puede verse en la figura 235, habiéndose marcado las conexiones a los tres anillos del rotor que están decaladas de una tercera parte del total

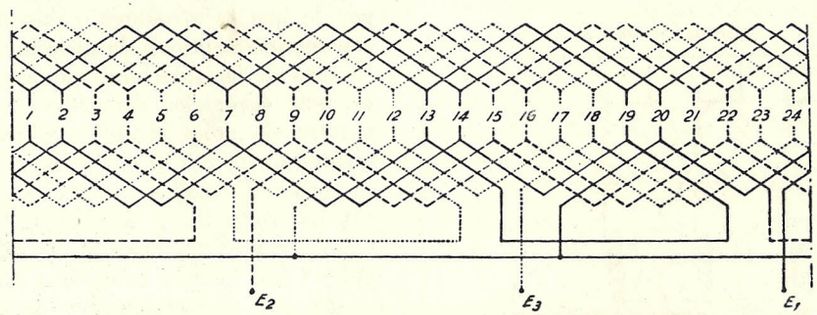

FIG. 235. — Bobinado ondulado para rotor de un motor asincrónico trifásico.

de cada una. Por tratarse de un bobinado doble capa, en cada ranura hay dos lados de bobina, uno superior y otro en el fondo de la ranura; en consecuencia se hacen 24 bobinas iguales que quedan conectadas por los puentes frontales a los tres anillos. Se pueden notar perfectamente las conexiones de inversión, que se trataron en el capítulo XX.

La ventaja de los bobinados ondulados para rotor, es el menor número de conductores colocados en las cabezas del mismo, pues se emplea menos cobre

y se reduce el peso de la parte móvil de la máquina. Además, con los devanados ondulados, se consiguen tensiones de rotor más grandes con menor número de conductores que en los imbricados, lo que obliga a emplear en estos últimos un número elevado de espiras por bobina. Tenemos entonces, que los devanados ondulados permiten la construcción en barras, que aprovecha mejor la dimensión de la ranura, mientras que los imbricados se hacen a múltiples espiras por bobina, requiriendo ranuras de mayor tamaño.

En cuanto a la ejecución, podemos decir que se conecta siempre una barra o lado de espira superior con otro lado inferior, que está una cantidad de ranuras más adelante igual al paso del bobinado, dado por las tablas vistas para devanados del estator. El paso, como vimos, se acorta al terminar una vuelta completa, reduciéndose en una ranura, en cuyo punto se hace la conexión de inversión y se hace otro recorrido de una vuelta del rotor, pero en sentido contrario a la primera. El procedimiento ya ha sido visto para el estator.

Bobinados con número de polos variable

Uno de los procedimientos para regular la velocidad de los motores asincrónicos, y para limitar la corriente de arranque, es el de cambiar el número de polos, con lo que se consiguen distintas velocidades de giro. Si se debe cambiar el número de polos del devanado del rotor, el problema se complica, con respecto a idéntico cambio en el estator, pues en este último se puede realizar mediante un conmutador conectado a la caja de bornes, mientras que en los rotores se debe colocar un juego de anillos rozantes.

Para poder efectuar la conmutación con facilidad, se debe tener el número mínimo de conexiones cambiantes, por lo que se requieren bobinados con mínima cantidad de puentes.

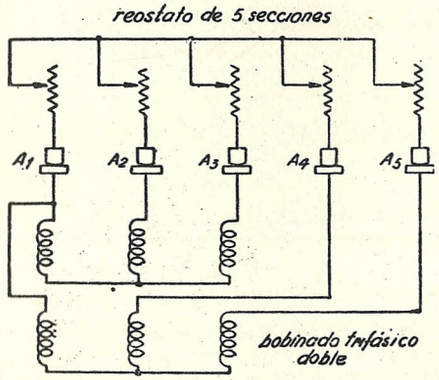

FIG. 236. — Bobinado de rotor que duplica el número de polos con las fases divididas en dos secciones.

Una de las soluciones simples es efectuar devanados del rotor, cuyo número de polos cambie conjuntamente con el número de fases. Así se tienen devanados que funcionan con cuatro polos y seis fases, con seis polos y cuatro fases, y con ocho polos y tres fases, y otros tipos más.

Un par de ejemplos nos permitirán ver mejor cómo se realizan estos trazados. Hay que distinguir entre los casos en que sólo se cambia el número de polos y los que modifican también el número de fases dentro del rotor. En general se prefieren los casos en que la cantidad de polos se cambia en dos pasos, generalmente duplicándola solamente. Por ejemplo pasar de 2 a 4 polos, de 4 a 8 polos, etcétera. Esta limitación se debe

a que para hacer los cambios se hacen necesarios más anillos rozantes y tal cosa complica constructivamente la máquina.

Veamos por ejemplo la figura 236, que nos muestra un bobinado trifásico donde cada fase está dividida en dos secciones, y el conjunto conectado a 5 anillos rozantes designados con A_1 a A_5. En realidad se hubieran necesitado 6 anillos, pero como no se requiere permutación de fases, bastan 5. Con una de las cantidades de polos, las secciones están en paralelo y el primer

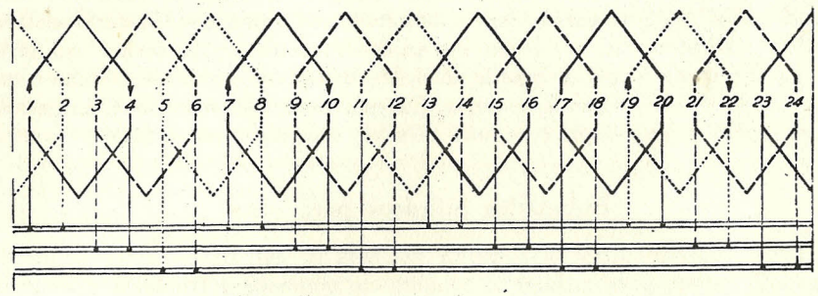

FIG. 237. — Bobinado para rotor que está en corto con 6 polos y cuatro fases, pero cortocircuitando los anillos pasa a tener 8 polos.

anillo conduce una corriente doble a la de los otros, mientras que al cambiar el número de polos las secciones quedan en oposición y el primer anillo no conduce corriente. El reóstato de 5 secciones trabaja de la manera normal para el arranque.

Si queremos presentar ejemplos donde se cambia simultáneamente el número de polos y fases, veamos la figura 237 que nos muestra un bobinado

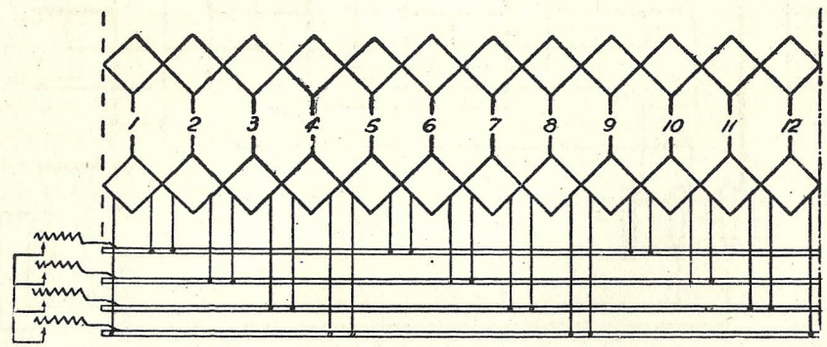

FIG. 238. — Bobinado para rotor de 4 polos y seis fases que pasa a funcionar con 8 polos y tres fases.

en el cual el número de polos y fases cambia al poner en corto las escobillas o levantarlas. Se trata en este caso de un bobinado que tiene 8 polos cuando las escobillas están en corto, mientras que funciona normalmente en corto-

circuito como de 6 polos, a 4 fases. Cuando tiene 8 polos las cuatro secciones de bobinas de cada fase quedan en paralelo, quedando las fases en triángulo con respecto a los anillos del rotor.

Otro ejemplo lo podemos ver en la figura 238, en la que se muestra un bobinado para rotor que funciona normalmente como bobinado de 6 fases y 4 polos en corto, o con 6 polos y 4 fases mediante los anillos y también con 3 fases y 8 polos como bobinado en corto. Tiene tres secciones en paralelo conectado en forma cuadrangular. Cuando se pasa al funcionamiento con 6 polos, las intensidades en el bobinado del rotor pueden ser rsguladas mediante resistores en serie con los anillos rozantes, en la forma ordinaria. Se ha ejecutado como bobinado a doble capa, con paso de bobina igual al paso polar considerando 6 polos. En este bobinado se usan 4 anillos rozantes, pero podría suprimirse uno si se lo conecta como bifásico.

Bobinados bifásicos para rotor

En algunos motores de pequeña potencia se emplea en el rotor un devanado bifásico, para reducir el número de conexiones frontales y asegurar

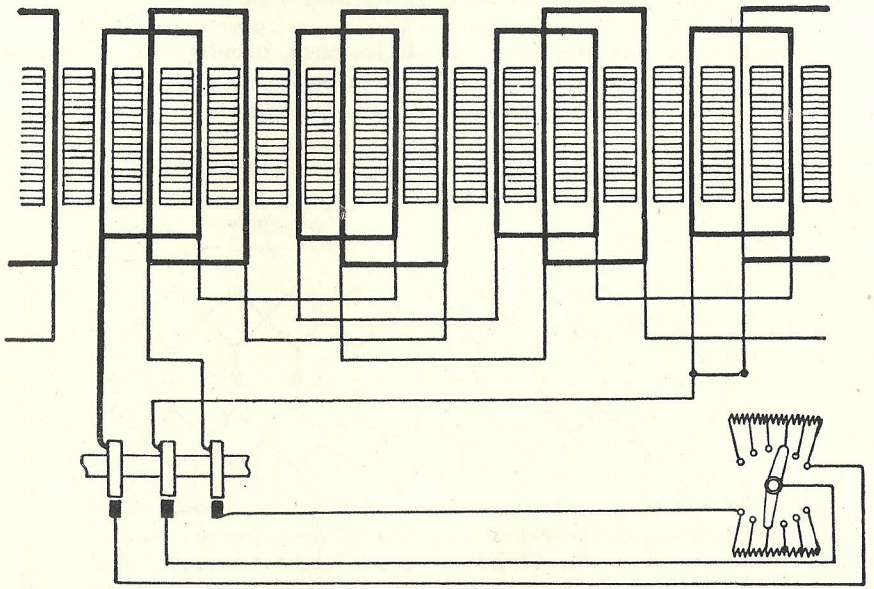

Fig. 239. — Bobinado bifásico de cuatro polos para rotor de motor asincrónico.

con más eficacia los conductores. La figura 239 muestra un bobinado bifásico de cuatro polos para rotor, ejecutado para un número reducido de ranuras, a razón de una bobina por polo y fase, o lo que es lo mismo, pues se trata de un devanado de simple capa, dos ranuras por polo y fase.

La ejecución es muy simple, pues devanando las cuatro bobinas inferiores, lo que puede hacerse sin interrumpir para nada el alambre, siguiendo con los sentidos indicados en la figura, se arrollan las cuatro bobinas superiores a continuación de las otras, haciendo los puentes frontales que se ven en la figura.

Los extremos de fase se unen a los anillos rozantes, habiendo uno de ellos que es común a las dos fases y que se une al punto central del reóstato de arranque. Los otros extremos de las fases se conectan a los otros dos anillos, los que, mediante las escobillas, pasan a los extremos de las dos secciones del reóstato.

Obsérvese que, debido a que la manija del reóstato tiene movimiento circular, girando el contacto de izquierda a derecha en la sección superior, y de derecha a izquierda en la inferior. para tener eliminación simultánea de resistencia en las dos secciones, se debe conectar a las escobillas extremos opuestos de las dos resistencias.

En forma similar se procede para devanados bifásicos de mayor número de ranuras o de polos, y con posibilidad de cambiar el número de polos mediante conmutación de las secciones.

CAPÍTULO XXIII

BOBINADOS DE MOTORES MONOFÁSICOS

En el estudio de los motores asincrónicos trifásicos, tratados en capítulos anteriores, vimos que el estator estaba construído con una serie de ranuras en las que se alojaban los conductores del bobinado. Se ocupaban todas las ranuras con las bobinas.

Con los motores monofásicos del mismo tipo, es decir, con los de inducción, pasa algo parecido, haciendo la salvedad que a veces no se ocupan

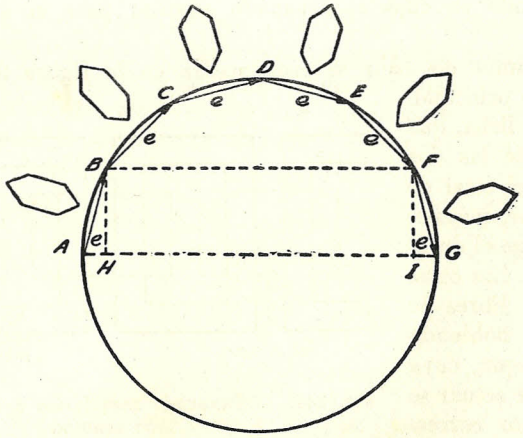

FIG. 240. — Principio de la distribución del devanado.

totalmente las ranuras del núcleo con el bobinado, pues no se obtiene provecho con la mayor inversión de cobre.

Para explicar esto, observemos la figura 240, que representa esquemá-

ticamente un estator de un motor monofásico de dos polos, y que suponemos que tiene 12 bobinas en total, o sea 6 por polo. Si tal bobinado fuera cortado por un campo giratorio se engendraría en cada bobina un f.e.m. de igual valor pero en distinto instante, es decir que las seis tensiones presentes en las seis bobinas no estarían en fase. Como las bobinas están conectadas en serie, se deben sumar sus tensiones, suma que debe tener carácter vectorial o geométrico.

En la misma figura 240, se ve que la suma de los seis vectores resulta igual al diámetro del círculo, o sea que la tensión total es menor que la suma aritmética de las seis tensiones parciales.

Si en vez de ocupar todas las ranuras, se hubieran colocado solamente cuatro bobinas, por ejemplo, las 2, 3, 4 y 5, se hubieran inducido en las mismas tensiones de igual valor que antes, y conservando la fase entre sí. Como la tensión total debe ser la suma vectorial de las cuatro tensiones parciales, vemos que la suma geométrica de las cuatro tensiones que tenemos ahora es la recta BF, que trasladada al diámetro resulta ser igual a HI, que es poco diferente del diámetro AG mismo (exactamente 0,866 del mismo).

En resumen, si ocupamos todas las ranuras tenemos una ganancia de tensión de valor reducido (0,134 con respecto a un diámetro igual a 1,00), pero debemos utilizar un 50 % más de cobre, pues de cuatro bobinas pasamos a seis, exactamente una mitad más. No hay compensación, pues para mejorar la f.e.m. en un 15 %, debemos invertir 50 % más de cobre en el bobinado.

Éste es el motivo por el cual casi todos los devanados monofásicos se hacen ocupando sólo 2/3 de las ranuras del rotor, dejando las restantes (1/3) vacías o bobinando en ellas el devanado auxiliar para el arranque, como veremos.

Lo que acabamos de decir se esquematiza en la figura 241, en la que se ve el devanado principal, trazado con línea llena, que ocupa exactamente las dos terceras partes del total de ranuras del estator, que tiene 18, es decir, que el devanado ocupará 12. Las otras seis que quedan libres se ocupan con el bobinado auxiliar de arranque, cuya misión y forma de actuar se vió en el capítulo correspondiente (cap. VIII).

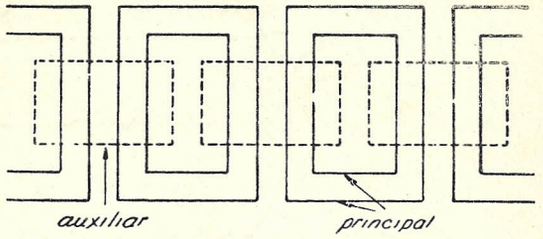

FIG. 241. — Devanado monofásico a ocupación parcial de ranuras.

Las bobinas se dibujan cerradas, por tratarse de un esquema demostrativo, pero más adelante se verá cómo se conectan entre sí cada una de ellas.

Compárese la figura 241 con la figura 242 que representa el mismo bobinado monofásico, pero en el cual se ocupan todas las ranuras para el principal, es decir, sin dejar ranuras vacías o disponibles para el auxiliar

de arranque. Se nota a simple vista el aumento de cobre con respecto al de ocupación parcial, sin que las ventajas logradas lo compensen.

De modo pues, que en la práctica realizaremos los devanados monofásicos utilizando sólo 2/3 de las ranuras del estator, o cifra más aproximada a tal cantidad, pues no siempre esta fracción resulta una cantidad entera de bobinas.

Casi siempre, salvo los casos que se verán, los devanados monofásicos se hacen del tipo concéntrico que hemos llamado antes en cadena (ver capítulo XVIII), porque se facilita el dejar ranuras vacías, pues si se hace del tipo de bobinas iguales se alargarían un poco las conexiones frontales. Pese a esto, se encuentran devanados monofásicos de tipo progresivo que se han definido y agrupado como imbricados y ondulados, según el sentido de tal progresión en el contorno del estator.

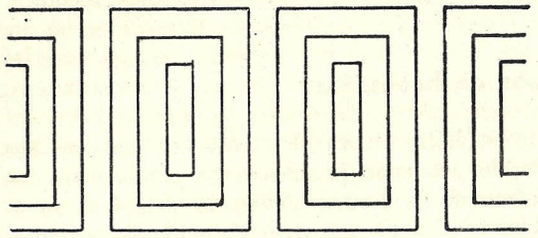

FIG. 242. — Devanado monofásico a ocupación total de ranuras.

La figura 243 representa un devanado progresivo monofásico, a ocupación parcial de ranuras, en representación esquemática, al solo efecto de hacer notar cómo se dejan vacías algunas ranuras. No figuran las conexiones entre bobinas, pues ello será tratado con más detalle posteriormente. Nótese la menor cantidad de cobre con respecto a un devanado completo, sin que se alteren notablemente las características de la máquina.

Recordemos de paso, que en *corriente continua* no se presentaban tales contingencias, pues la disposición del campo magnético era concentrada y

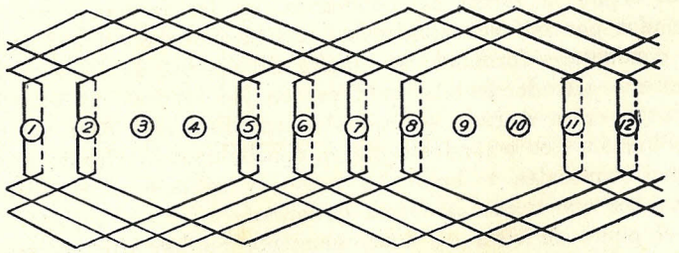

FIG. 243. — Devanado monofásico progresivo a ocupación parcial de ranuras.

no distribuída, de manera que no se planteba el efecto de la suma vectorial en la forma señalada.

El hecho de que las dos terceras partes de las ranuras se ocupen con el devanado principal y una tercera parte con el auxiliar, permite plantear los casos de transformación de motores trifásicos en monofásicos y viceversa,

interesantes por la frecuencia con que se presentan y la facilidad con que se resuelven; esto se tratará más adelante, como caso particular de devanados, y dando en lo posible ejemplos numéricos para su mejor comprensión capítulo XXV).

El estudio del devanado auxiliar mencionado tantas veces hasta aquí, su objeto y conexiones, lo estudiamos en el capítulo VIII. Resaltamos desde ya que todos los métodos de arranque no afectan al funcionamiento normal del motor, de modo que la teoría general de los devanados monofásicos puede hacerse con prescindencia del bobinado auxiliar, utilizado para obtener el impulso inicial necesario a fin de que el motor adquiera movimiento.

Tipos de bobinados

Los motores de inducción monofásicos tienen el estator bobinado en dos formas distintas, según se trate de potencias grandes o pequeñas. Para los de gran potencia se utiliza solamente la fase o devanado principal en el estator y el rotor se hace bobinado. No es necesario el bobinado auxiliar, pues son capaces de arrancar por sí mismos, mediante el funcionamiento como repulsión y otros.

Los de pequeña potencia tienen en el estator el devanado principal, ocupando más o menos 2/3 del total de ranuras y en las restantes se coloca el bobinado auxiliar para arranque. En estos motores el rotor es, generalmente, a jaula de ardilla. Eléctricamente, los devanados auxiliar y principal, guardan un apartamiento de 90° entre sí, para obtener el máximo efecto Ferraris durante el arranque.

El bobinado principal de estos motores es igual al único que tienen los anteriores, de mayor potencia, de modo que en las descripciones siguientes se tendrá en cuenta tal detalle para evitar repeticiones.

En lo que respecta a la ejecución, se puede clasificar a los devanados monofásicos según la forma de bobinarlos, en los formados por *madejas* y los formados por *bobinas moldeadas*. Los primeros están compuestos por un haz de conductores formando un amplio círculo, que se dobla varias veces sobre sí mismo introduciéndolo cada vez en las ranuras del estator y conectando luego entre sí cada serie de bobinas formadas para completar la serie del bobinado. Los segundos se hacen con bobinas moldeadas a máquina, sobre formas especiales, o hechas a mano, y se colocan también en las ranuras una vez que tienen la forma definitiva.

Desde el punto de vista del funcionamiento no hay diferencias substanciales entre ambos tipos, sino que se emplea uno u otro según se trate de hacer un solo bobinado o varios de igual tipo, empleándose la fabricación en serie para abaratar la mano de obra.

Como existen ciertas diferencias en la ejecución de ambos tipos, los describiremos aparte, a fin de poner en evidencia en los esquemas las citadas diferencias.

La fase o devanado auxiliar se ejecuta dentro del mismo principio que el

principal, es decir, que será del tipo en madeja o de moldes, según sea de una o de la otra forma el devanado principal.

Los motores que no llevan bobinado de arranque también están comprendidos en esta clasificación.

EJECUCIÓN DE BOBINADOS EN MADEJA

Para confeccionar devanados de este tipo se prepara una madeja formada por varias vueltas de alambre conductor, cuya cantidad estará de acuerdo con la cantidad de espiras que debe formar el haz de conductores a ubicar en cada ranura del estator. El aspecto de una madeja es el de un aro de gran dimensión, con dos terminales que corresponden al principio y final del arrollamiento. El bobinador de experiencia hace la madeja sin tomar medidas, pero para un motor de tamaño distinto o al que se le debe cambiar las características, se ensayará el diámetro que debe tener el aro múltiple de conductores para poder dar con él la cantidad de pliegues que formará el bobinado. La prueba se puede hacer con un hilo único y medirlo después. Es conveniente, de todos modos, que para confeccionar cada madeja se tome una forma circular de madera con una garganta en la que se alojará el alambre. Se sujeta la punta del conductor y se hace dar vueltas al disco de madera con lo que aquél se arrollará, contándose las vueltas necesarias. Se retira la madeja terminada de la forma y se está en condiciones de colocarla en las ranuras del estator.

La madeja forma la sección del bobinado que corresponde a un polo, de modo que habrá tantas de ellas como polos tenga el motor. Es sabido que la cantidad de polos está ligada a la frecuencia de la red y a la velocidad de giro del motor por la relación:

$$n = \frac{120\,f}{p}$$

en la que n es la velocidad de giro en revoluciones por minuto (r.p.m.); f es la frecuencia, generalmente igual a 50 ciclos por segundo; p es el número de polos del motor, o más bien dicho, del bobinado del estator, pues la mayor parte de los motores monofásicos no tienen masas polares salientes sino que son de campo distribuído, como las máquinas trifásicas.

Así, por ejemplo, un motor de dos polos dará 3000 r.p.m.; uno de cuatro polos dará 1500 r.p.m.; de seis, 1000 r.p.m.; de ocho, 750 r.p.m., etcétera.

Colocación de la madeja en el estator

Para hacer una sección del bobinado correspondiente a un polo, se siguen las operaciones indicadas en la figura 244. El primer paso es colocar los dos lados de la madeja en las dos ranuras que corresponden, según se verá al desarrollar los bobinados, y tirar el sobrante para un lado. En la figura

se ha subido la madeja hacia arriba (figura a) hasta que se pueda dejar una curva mínima sin comprometer la aislación del alambre.

Con la parte superior se da media vuelta alrededor de un eje vertical, de manera de estrangular la madeja, con lo que cruzarán los dos lados, y se coloca nuevamente ambos en dos ranuras distintas del estator, las dos inmediatas más alejadas del eje supuesto. Ahora el sobrante de la madeja está colocado hacia abajo como en (b).

Se vuelve a dar un giro de media vuelta al plano de la madeja, con nuevo estrangulamiento y cruce del haz de conductores sobre sí mismo, ha-

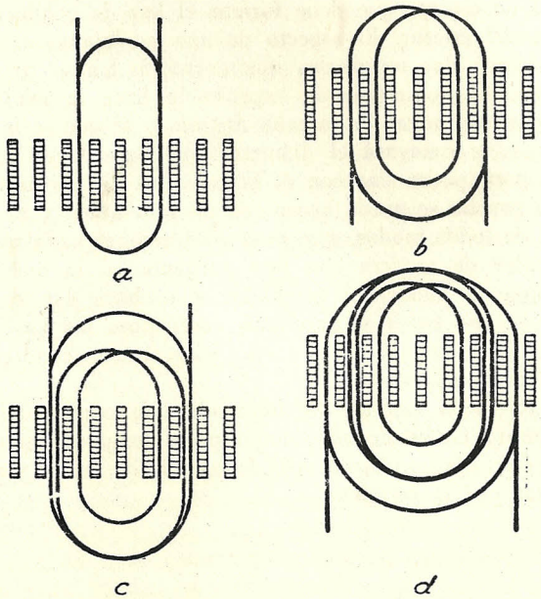

Fig. 244. — Principio de ejecución de los bobinados en madeja.

ciendo entrar los dos lados del aro en dos ranuras, pero esta vez no son distintas, sino que son las mismas de la figura (b), sólo que los lados de la madeja se colocan encima de los que ya estaban adentro de la ranura, como se ve en (c). En la figura, para simplificar, se los ha dibujado uno al lado del otro, pero están encimados.

Tenemos otro sobrante, colocado hacia arriba, con el que se da media vuelta sobre sí mismo, y se lo vuelve para abajo, colocando los dos lados de la madeja en dos ranuras más alejadas del eje, tal como se ve en (d). Si hubiera más ranuras por polo, se seguiría con este proceso hasta terminar la madeja, encimando siempre dos lados de la misma, salvo el primero y el último, que se dejan para el comienzo y fin de secciones contiguas. Al dejar terminada la sección, queda disponible el par de terminales para ser conectada a las secciones restantes del bobinado.

Conexiones entre las distintas secciones del bobinado

Vimos que cada madeja, una vez colocada en el estator, deja disponible dos terminales. También se dijo que el número de madejas es igual al número de polos del motor, de modo que el número de terminales será doble del número de polos, mientras que los bornes de la máquina son solamente dos, pues se debe conectar a una red monofásica. Está claro que todos los terminales se unirán con puentes de conexión, hechos convenientemente, de modo de dejar solamente dos libres, que se unirán a los bornes del motor. Algunos motores que deben trabajar en dos tensiones distintas tienen cuatro bornes, de modo que el bobinado se puede conectar con dos secciones en serie, para la tensión mayor, o en paralelo para la menor. Un ejemplo típico es el de los motores para 220/110 Volt.

Un motor de dos polos tiene dos secciones en el bobinado y veamos cómo debe conectárselas entre sí. Para ello haremos unas consideraciones previas.

Si se tiene una bobina recorrida por una corriente eléctrica, según se ve en la figura 245, se produce en su interior un campo magnético que puede asimilarse al producido por un imán, y que, por lo tanto, tendrá un polo Norte y otro Sud. Se puede encontrar la polaridad magnética mediante la *regla práctica del tirabuzón*, que dice que haciendo girar un sacacorchos en la dirección del eje de la bobina y de forma que acompañe al sentido de circulación de la corriente, aquél avanzará en dirección al polo Norte; es decir que el polo Norte es aquél por el que sale el tirabuzón. En la figura, él está colocado a la izquierda.

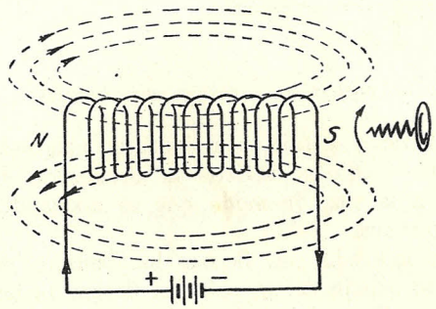

Fig. 245. — Regla del tirabuzón.

Si se quiere que el polo Norte esté a la derecha, se debe invertir el sentido de la circulación de corriente en la bobina para que el tirabuzón gire en sentido contrario, o lo que es lo mismo, cambiar las conexiones exteriores, invirtiendo la entrada con la salida de corriente. Cuando un motor tiene dos polos, uno debe ser Norte y otro Sud; cuando tiene mayor número de polos, debe haber una mitad de ellos de polaridad Norte y la otra mitad Sud, colocados alternados en la periferia del estator.

Esto dice que la corriente debe recorrer dos secciones contiguas de bobinado en sentidos contrarios, lo que implica que si en una la corriente entra por el principio y sale por el final, en la otra debe entrar por el final y salir por el principio. Si hubiera mayor cantidad de polos, se conectará uno directo, otro inverso, el tercero directo, y así sucesivamente.

La figura 246 plantea un caso práctico de lo que acabamos de decir;

en ella se ve un esquema simplificado de un bobinado de dos polos, indicándose éstos simbólicamente, pues sabemos que estos motores no tienen masas polares. El devanado tiene dos secciones, de modo que las polaridades magnéticas de los campos que producen deben ser contrarias, luego los terminales de ambas secciones deben estar cruzados, es decir, conectados en la forma que se ve en la figura. E indica la entrada de corriente y S la

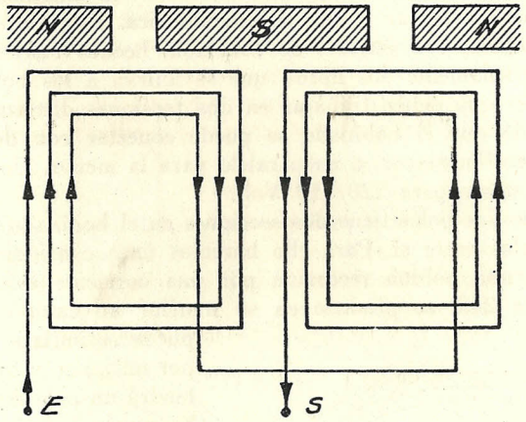

FIG. 246. — Principio de ejecución de los puentes de conexión entre bobinas.

salida; esto en corriente alternada no tiene sentido, o si lo tiene, vale solo para medio ciclo, pues durante el otro medio se invierte la circulación de corriente, pero en ambos bobinados a la vez, de modo que se mantendrá la oposición de los dos campos magnéticos.

Para completar la figura se han indicado con flechas los sentidos de circulación de corriente, notándose que debajo de un polo las flechas tienen sentido contrario que debajo del otro. Para devanados de mayor número de polos, se seguirá con esta práctica, es decir, se invertirá la entrada y salida de corriente para la mitad de las bobinas, alternadamente. En los ejemplos de bobinados se insistirá sobre esto.

Diseño del bobinado

Para determinar el tipo de bobinado a ejecutar, es indispensable conocer algunas de las características del motor, entre las que se encuentra en primer lugar el número de polos que debe quedar fijado como sabemos, por la velocidad de giro deseada. En segundo lugar hay que conocer el número de ranuras del estator, para determinar la cantidad de las mismas que corresponden a cada polo. Después se decide si debe llevar o no fase auxiliar para el arranque, de acuerdo con las consideraciones hechas anteriormente, y finalmente, hay que saber la cantidad de espiras que debe tener cada madeja.

Del total de ranuras del estator, se toma aproximadamente las dos terceras partes para el devanado principal, dejando el resto vacías, o llenándolas con el bobinado de arranque. De modo pues, que la cantidad de ranuras por polo será, aproximadamente:

$$\frac{2\ Z}{3\ p}$$

siendo Z el número total de ranuras del estator. Este resultado debe dar un número entero, preferiblemente. Si no es entero, se puede ejecutar el bobinado llamado de ranuras fraccionarias (ver capítulo XXI), que no resulta simétrico, con secciones distintas, por lo que se producirá algún desequilibrio en el funcionamiento.

El paso del bobinado, en los tipos en madeja, es distinto para cada espira de la sección, pues es igual o casi igual al polar para la espira externa y se va reduciendo en cada pliegue de la madeja. La tercera parte de ranuras libres o correspondientes al devanado auxiliar deben quedar en el centro de cada sección de bobinado que forma cada polo, para obtener el defasaje geométrico de 90° entre el bobinado principal y el auxiliar.

El número de espiras de cada madeja se hace igual al bobinado original, si la tensión de la red no ha variado, esto es, si el motor debe trabajar en las mismas condiciones. En caso contrario, es decir, si se debe rebobinar para otra tensión de trabajo, el nuevo número de espiras estará, con respecto al original, en la misma relación como lo están las dos tensiones, nueva y anterior. Las secciones del conductor a emplear, en cambio, estarán en la relación inversa de la anterior.

Así, si un motor de 110 Volt debe trabajar en 220 Volt, se debe dar a cada madeja doble número de espiras, pero el conductor será de la mitad de sección. Y así se resuelven los demás casos que se presenten.

EJEMPLOS DE BOBINADOS EN MADEJA

A fin de aclarar conceptos y facilitar al lector la asimilación práctica de lo dicho hasta aquí, se tratarán algunos casos típicos de bobinados de motores monofásicos, en los que se deba ejecutar devanados en madeja, los que, si coinciden las características, pueden servir de modelos para ciertos casos particulares.

Los motores monofásicos más usuales tienen dos o cuatro polos, y aunque los hay de menor velocidad, ellos no son tan generalizados. Por esto, los dos ejemplos que siguen corresponden a esos dos tipos. No hay ninguna dificultad en extender el diseño a motores multipolares, examinando la descripción general y los casos expuestos en ejemplos.

Bobinado monofásico de dos polos

Supongamos que se debe ejecutar un bobinado monofásico, en un motor que gira a razón de 3000 revoluciones por minuto, y que tenga en el estator 18 ranuras.

La cantidad de ranuras por polo, atendiendo a las consideraciones anteriores, es:

$$\frac{2 \times 18}{3 \times 2} = 6 \text{ ranuras por polo}$$

que corresponden a un total de 12 ranuras para la fase principal y 6 para la auxiliar, es decir, en la proporción ideal de $^2/_3$ a $^1/_3$, estipulada.

Se procede a numerar las ranuras de 1 a 18, como se ve en la figura 247, suponiendo los ejes de polos entre las ranuras 5-6 y 14-15, es decir, distando entre sí de 9 ranuras, o sea media vuelta de estator, como corresponde a una máquina bipolar. Alrededor de los ejes polares hay que dejar las ranuras

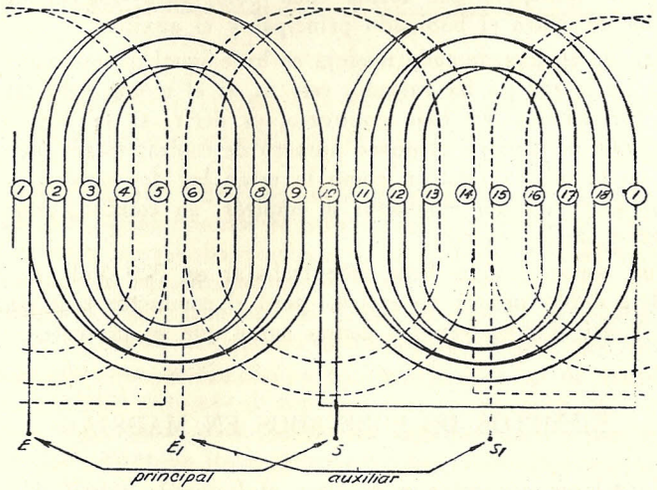

FIG. 247. — Bobinado monofásico de dos polos, en madejas.

para la fase auxiliar, la mitad en cada polo, de modo que debemos dejar tres ranuras en cada polo. Dejamos, por simetría, la mitad de la 4, la 5, la 6 y la mitad de la 7, en una sección, y la mitad de la 13, la 14, la 15 y la mitad de la 16 en la otra sección.

La primera espira de la madeja se debe ubicar entonces, en las ranuras 4 y 7 por un lado y en las 13 y 16 por el otro, ocupando la mitad inferior de las mismas. La espira de vuelta ocupa las mitades internas de las ranuras 3 y 8 en una sección y las 12 y 17 en la otra.

Sobre esos lados vuelve sobre si misma la madeja, ocupando las mitades

superiores de las ranuras (en la figura se indica la ida y la vuelta contiguas en lugar de superpuestas, por simplicidad de dibujo). El nuevo pliegue ocupa el fondo de las ranuras 2 y 9, volviendo la madeja sobre sí misma en las mismas ranuras para dar la última vuelta en las ranuras 1 y 10, en las que termina la sección correspondiente a un polo. La otra sección terminó en las ranuras 10 y 1, pero la parte superior, es decir, que el principio de la primera sección está en el fondo de la ranura 1 y el fin en la de la 10; la segunda sección tiene su principio en el borde de la ranura 10 y el fin en la parte superior de la 1.

La fase auxiliar, correspondiente al devanado de arranque, no necesita ser igual a la principal, haciéndose generalmente de alta resistencia. En nuestro ejemplo la hemos ejecutado también en madeja, pero con menos espiras, pues tiene disponibles la mitad de ranuras que el bobinado principal. Así, para una sección de la misma, ocupamos las ranuras 7 y 13 con la primer vuelta y las 6 y 14 con la otra vuelta, dándola por terminada. En forma similar se hace la otra sección, en las ranuras 16 y 4, primero y en las 15 y 5 después.

Podría haberse dado otra vuelta más, ocupando las mitades que quedaron libres en la ranura 5, 6, 14 y 15, pero ello sólo será necesario si el diseño del devanado lo requiere.

Falta ahora considerar las conexiones frontales a ejecutar entre las distintas secciones de los bobinados principal y auxiliar. Con las consideraciones que se hicieron al respecto, sabemos que se debe invertir el sentido de corrientes en una de las secciones de cada bobinado. Por ello se parte de la entrada E del bobinado principal, cuya salida se une al fin de la otra sección, para terminar con su principio, que constituye la salida S de dicho devanado. El bobinado auxiliar tiene su entrada E_1, de la cual se pasa al fin de esa sección y de aquí al fin de la otra para tener la salida de este devanado en S_1, principio de la segunda sección.

En la figura se ha indicado al devanado auxiliar con línea punteada y al principal con línea llena, para facilitar la comprensión del trazado y seguirlo con más comodidad. Las conexiones recíprocas entre ambos devanados han sido tratadas en el subtítulo anterior, de modo que no insistiremos sobre ello.

Bobinado monofásico de cuatro polos

Se trata de diseñar el trazado del bobinado principal y auxiliar para un motor monofásico que debe girar a 1500 r. p. m., por lo que corresponden cuatro polos. Supongamos que el número de ranuras del estator sea 36, según se ve en la figura 248.

La cantidad de ranuras para la fase principal será alrededor de $^2/_3$ del total, o sean 24, y la cantidad de ranuras por polo es la cuarta parte de ésta

cantidad, es decir 6. Esto se puede obtener directamente mediante la fórmula dada anteriormente, es decir:

$$\frac{2 \times 36}{3 \times 4} = 6 \text{ ranuras por polo}$$

Los ejes de polos deben distar entre sí de la cuarta parte del total de ranuras, cantidad que se llama paso polar y que es siempre igual al cociente entre la cantidad de ranuras y de polos:

$$\text{paso polar} = \frac{Z}{p}$$

en nuestro caso numérico, el paso polar es de 9 ranuras, de modo que marcamos los ejes de polos entre las ranuras 5-6, 14-15, 23-24 y 32-33. Alrededor de los ejes polares se dejan las ranuras para la fase auxiliar, que dispone

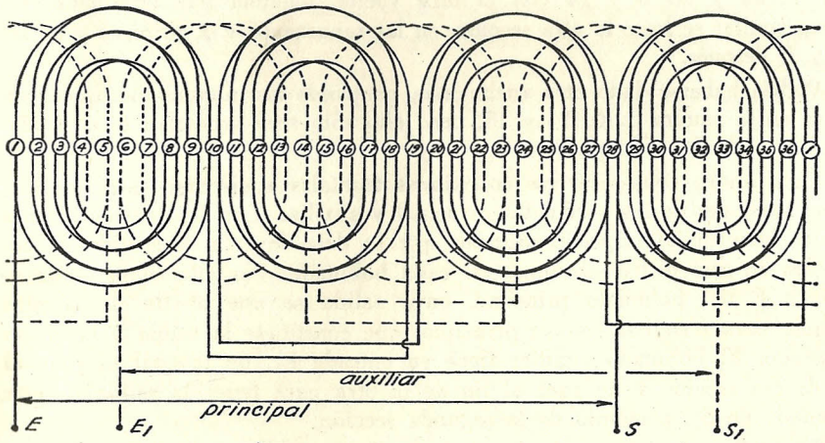

FIG. 248. — Bobinado monofásico de cuatro polos, en madejas.

en total de la tercera parte de ranuras del estator, es decir, de 12 ranuras, o sea 3 por polo. Por simetría dejamos 1 ½ a cada lado del eje. Así, por ejemplo, en la primer sección, correspondiente al primer polo de la izquierda, dejamos la mitad de la ranura 4, y la 5 completa de un lado del eje, y la 6 y la mitad de la 7 del otro lado del mismo eje. En la misma forma se procede para las demás secciones o polos.

Describiremos el trazado de una sección de bobinado, pues las demás se ejecutan de idéntica manera. La primer espira de la madeja se coloca en las ranuras 4 y 7, y después del pliegue superior se pasa por las N° 3 y 8 para volver por las mismas ranuras hacia arriba, dar un nuevo pliegue y bajar por las 2 y 9, subir por ellas mismas y terminar en las 1 y 10. En la misma forma se trazan las demás secciones, que terminan en las ranuras 10-19, 19-28 y 28-1, respectivamente.

La fase auxiliar se hace también en madeja, pero con menos pliegues que

la principal, dos solamente, por disponerse de menor cantidad de ranuras, y porque no es necesario que sea igual. Así, una de sus secciones tiene la primer espira de madeja en las ranuras 7 y 13 y la segunda en las 6 y 14, donde termina. Las demás secciones son idénticas a ésta, y se ven claramente en la figura 248, pues se ha dibujado el bobinado auxiliar con línea punteada y el principal con línea llena.

Las conexiones entre secciones se hacen alternando principios y finales de bobinas, para invertir los sentidos de la corriente, según ya se explicó. Así, si la entrada del bobinado principal está en el comienzo E de la primer sección, su final se une al fin de la segunda sección y el principio de ésta al de la tercera, para pasar al fin de la cuarta y salir finalmente por el principio de la cuarta, que constituye la salida S del devanado principal. El bobinado secundario tiene su entrada E_1 a 90° de la principal, y pasa a las demás secciones uniendo un final con otro final de bobina y un principio con el principio de la siguiente, como se ve en la figura y a fin de cumplir las inversiones de los sentidos de las corrientes en dos polos consecutivos. La salida de la fase auxiliar está también a 90° de la principal, y si se observan ambos bobinados se nota que guardan ese mismo ángulo en todo el trazado.

EJECUCIÓN DE BOBINADOS EN CADENA

En el comienzo del capítulo clasificamos a los devanados monofásicos en los tipos en madeja y los de bobinas moldeadas. Estos últimos tienen el aspecto clásico de los devanados trifásicos llamados "en cadena" (ver capítulo XVIII), por lo que los denominaremos de esta manera.

Las consideraciones hechas sobre la ocupación de ranuras por la fase principal y la auxiliar en los del tipo madeja son válidas aquí, de modo que diremos, igual que antes, que la cantidad de ranuras por polo, para la fase principal es:

$$\frac{2 Z}{3 p}$$

siendo, igual que en los casos tratados anteriormente, Z el número total de ranuras y p el número de polos. La cantidad de ranuras por polo debe dar un número entero, pues en caso contrario resultaría un devanado a ranuras fraccionarias, que se trata siempre de evitar.

También se dijo que el número de polos resulta de la velocidad de giro deseada para el rotor, de modo que si esta última cantidad es un dato, se tiene inmediatamente conocido p. Usualmente, los motores monofásicos son de 2 ó 4 polos, excepcionalmente 6 y más raro aún de mayor número de polos, por lo que en los ejemplos sobre este tipo de bobinados nos limitaremos también a números de polos reducido.

Principio de ejecución

Supongamos que se tenga un número dado de ranuras por polo, 6 por ejemplo, que representamos en la figura 249. Una tercera parte de las mismas corresponden al devanado auxiliar, que se dejan en la parte central del grupo de ranuras, es decir, serán las Nº 3 y 4. Las cuatro restantes son para la fase principal.

Para trazar las bobinas se unen las ranuras 1 con 6 y 2 con 5, como se puede ver en la figura, con lo que se tienen formadas dos bobinas concéntricas, cada una de las cuales está constituída por un haz de conductores activos formando un paquete encintado. Las dos bobinas deben conectarse entre sí mediante el puente indicado con *a* en la figura, siguiendo el mismo sentido de circulación de corriente, pues las dos bobinas pertenecen a un mismo polo.

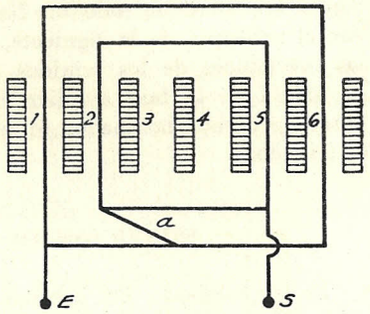

Fig. 249. — Principio de ejecución de los bobinados en cadena.

Con esto se tiene la sección del devanado principal que corresponde a un polo, con su entrada E y salida S, que deberá conectarse con las demás secciones en la forma como se verá en los bobinados completos.

El bobinado puede hacerse a mano o formando las bobinas a máquina sobre moldes de madera, y aún se pueden hacer a la vez todas las bobinas que corresponden a una misma sección, para que las conexiones entre ellas queden hechas ya antes de colocarlas en las ranuras del estator. El devanado auxiliar se ejecuta exactamente bajo el mismo principio.

En cuanto a las conexiones entre las distintas secciones del bobinado, se hacen en la misma forma como para los bobinados en madeja ya tratados, de modo que se puede ver el tema en el párrafo correspondiente, al que pertenece la figura 246.

EJEMPLOS DE BOBINADOS EN CADENA

Trataremos también en este caso algunos ejemplos numéricos de bobinados en cadena, correspondientes a motores de reducido número de polos, por ser los más comunes, y para que sirvan de modelo en los casos en que coincidan los datos, o de ayuda para aclarar lo dicho sobre el diseño. Hay que convenir que no siempre se ejecutan los dos devanados del motor, principal y auxiliar, del tipo cadena, pues a veces el primero se hace con moldes y el auxiliar se construye en madeja. La razón es que el bobinado auxiliar debe tener una resistencia del valor calculado por la fábrica, y cualquier diferencia puede afectar al funcionamiento en el momento que tal bobinado actúa, que

es durante el arranque, debilitándose el par motor y pudiendo provocar que el motor no venza a la resistencia que se le impone. Con las madejas es más fácil imitar al bobinado original, por lo que se puede seguir esta práctica.

Bobinado monofásico de dos polos

Supongamos el mismo motor del ejemplo dado en el otro tipo de devanados, es decir, un motor de 3000 r.p.m. con 18 ranuras en el estator, que debe tener dos polos.

Se dibujan las ranuras y se las numera, como se ve en la figura 250. La cantidad de ranuras por polo está dada por:

$$\frac{2 \times 18}{3 \times 2} = 6 \text{ ranuras por polo}$$

para el bobinado principal, y para el auxiliar corresponderán $^1/_3$ del total, es decir 6 ranuras para todo el bobinado, o sea 3 por polo.

De acuerdo con las consideraciones hechas sobre la forma de realizar el

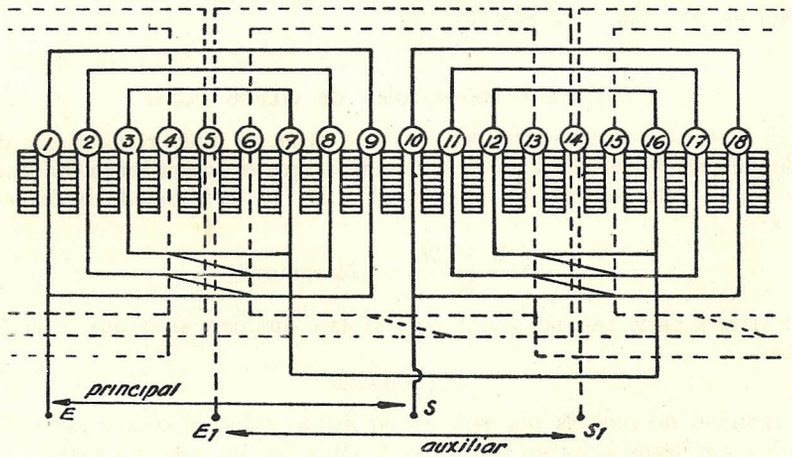

Fig. 250. — Bobinado monofásico de dos polos, en cadena.

trazado, suponemos los ejes de polos en las ranuras 5 y 14, distanciados entre sí del paso polar, que vale:

$$\frac{18}{2} = 9 \text{ ranuras}$$

alrededor de cada eje de polos se dejan las tres ranuras para la fase auxiliar, o sea una de cada lado y la del eje mismo, con lo que quedarán para el bobinado principal las ranuras 1, 2, 3, 7, 8 y 9 en una sección y las 10, 11, 12, 16, 17 y 18 para la otra sección. Con ellas se forman tres bobinas con-

céntricas, como se ve en la figura, conectadas entre sí mediante puentes internos, de acuerdo con la figura 249.

La fase auxiliar se hace con dos bobinas concéntricas, pero como disponemos solamente de tres ranuras por polo, dos lados de bobinas distintas deben ocupar una misma ranura. Esto no representa un inconveniente si se piensa que el devanado auxiliar tiene diferentes conductores que el principal, de modo que podrá entrar en la ranura fácilmente. Podría hacerse, en caso que no entrara, con una sola bobina por polo, ocupando las ranuras 4, 6, 13 y 15 y dejando vacías las 5 y 14.

Los puentes entre las distintas secciones del devanado se hacen siguiendo el principio general expuesto anteriormente, es decir, invirtiendo el sentido de las corrientes en dos secciones que corresponden a polos de signo sontrario. Así, por ejemplo, si la entrada del bobinado que se une a uno de los bornes del motor es E, que corresponde al grupo de bobinas de la izquierda, y la corriente recorre a tal grupo siempre en el mismo sentido, la salida que está en la ranura 7 debe unirse con la salida del otro grupo de bobinas, ubicada en la ranura 16, para sacar el final del bobinado por la ranura 10, en S. De este modo la corriente circula en el grupo de la derecha en sentido contrario al de la izquierda. Lo mismo se hace para la fase auxiliar, como se podrá observar en la figura. Ambos devanados están apartados geométricamente de 90°, como corresponde.

Bobinado monofásico de cuatro polos

Si tenemos un motor que debe girar a razón de 1500 r. p. m., su devanado debe ser hecho con 4 polos. Supongamos que el estator tenga 36 ranuras. Los $^2/_3$ de esta cantidad se utilizan para la fase o bobinado principal, es decir:

$$\frac{2 \times 36}{3} = 24 \text{ ranuras}$$

y la tercera parte restante queda para la fase auxiliar, si es que la necesita, o sea:

12 ranuras

La cantidad de ranuras por polo es en ambos casos la cuarta parte de las citadas, por tratarse de un motor de 4 polos, con lo que se tiene:

6 ranuras por polo para el bobinado principal
3 ranuras por polo para el auxiliar de arranque.

El paso polar, es decir la distancia entre ejes de polos medida como cantidad de ranuras, será en este caso:

$$\frac{36}{4} = 9 \text{ ranuras}$$

de modo que se pueden ubicar los ejes polares, para dejar alrededor de ellos ranuras destinadas a la fase de arranque.

Con 6 ranuras por polo para el bobinado principal se pueden hacer 3 bobinas concéntricas por polo, formando cada grupo de ellas una sección del devanado, que se deben conectar entre sí, en la siguiente forma (ver fig. 251).

Las tres bobinas de una sección se conectan de modo que la corriente siga un mismo sentido de circulación, para tener en ellas la misma polaridad del campo magnético que producen. En la figura están indicados los puentes internos a ejecutar.

Las cuatro secciones del bobinado, cada una de las cuales tiene tres bobinas ya conectadas, se deben unir de modo que la polaridad magnética

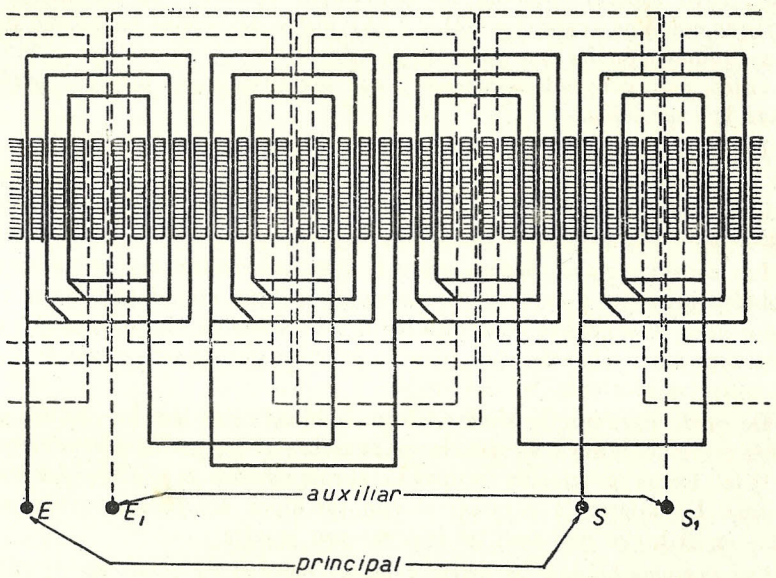

FIG. 251. — Bobinado monofásico de cuatro polos, en cadena.

resulte contraria en dos secciones inmediatas, es decir, cruzando las conexiones en la forma como ya se ha visto para ejemplos anteriores. Se obtiene así la entrada E y la salida S del devanado principal.

Para el auxiliar se procede en idéntica forma, uniendo las bobinas de un grupo con conexiones internas que permitan mantener el sentido de circulación de la corriente y con puentes cruzados que unan las distintas secciones del bobinado correspondientes a los cuatro polos. Se obtiene la entrada E_1 y la salida S_1 del bobinado auxiliar.

Las conexiones recíprocas entre el devanado principal y el auxiliar ya han sido tratadas en el capítulo VIII, de modo que no las haremos figurar aquí.

En la misma forma se ejecutan los devanados monofásicos para mayor número de polos o para distinta cantidad de ranuras que las que aparecen en los ejemplos precedentes, tanto para confección en madeja como en cadena. En efecto, la primera medida es calcular el número de ranuras por polo para

saber la cantidad de bobinas que se han de formar; el paso polar permite fijar los ejes de polos y después el resto es sumamente sencillo.

BOBINADOS PROGRESIVOS

En la clasificación de tipos de devanados no se especificó más que dos clases distintas, que se llamaron en madeja y en cadena, este último también denominado: "a bobinas de molde". Un tipo de devanado con bobinas de molde que no se puede englobar entre los de ejecución en cadena es el "*progresivo*", cuyo aspecto recuerda los imbricados utilizados en las máquinas de corriente continua (capítulos XII y XIX). Estos devanados se utilizan poco en las máquinas monofásicas, pues son más frecuentes los de madeja o de cadena ya vistos, pero convendría citarlos y aun presentar algún ejemplo, para completar la exposición.

Las bobinas que forman cada serie en ellos son iguales entre sí, de modo que se pueden construir con un molde de madera, dejando los dos terminales de la primera y última espira del conjunto de conductores que forman cada bobina para su conexión a las demás bobinas.

Las consideraciones hechas sobre la cantidad de ranuras ocupadas por el bobinado principal y las que quedan vacías o llenas con el auxiliar se repiten en este caso, pues ellas se refieren a todos los bobinados monofásicos. Lo mismo diremos respecto a la velocidad, número de polos, paso polar y cruce de conexiones entre las secciones del devanado.

De modo pues que se tratará de un bobinado distribuído, con tantas secciones como polos haya, estando formada cada sección por un grupo de bobinas de igual forma y tamaño, ocupando aproximadamente los 2/3 del total de ranuras. La diferencia substancial con los tipos anteriores estriba precisamente en el hecho que aquí las bobinas son iguales.

Las distintas bobinas se deben conectar entre sí de modo que la corriente en ellas forme un campo magnético del mismo signo para una serie o sección y de signo contrario para la inmediata siguiente, a fin de tener alternados los polos Norte con los Sud.

Se pueden ejecutar a una o a dos capas, según la cantidad de bobinas que se desee colocar y la cantidad de ranuras disponibles. Ambos sistemas se encuentran entre los pocos existentes de este tipo.

Trazado de un bobinado de dos polos

Supongamos que se trata de un motor de 3.000 r.p.m al que se le debe ejecutar un bobinado tipo progresivo y que el estator tiene 18 ranuras. Además, debido a que el diseño así lo requiere, es necesario que sea hecho en doble capa, es decir que cada ranura tendrá dos lados de bobina, uno en el fondo y otro encima del anterior.

Como sólo ocuparemos con el devanado principal las dos terceras partes del total de ranuras, que es:

$$\frac{2 \times 18}{3} = 12 \text{ ranuras}$$

y como se hace en doble capa, habrá también 12 bobinas, con 24 lados de bobina en total.

La cantidad de ranuras por polo es:

$$\frac{12}{2} = 6 \text{ ranuras por polo}$$

por tratarse de una máquina bipolar. Se ubican los ejes de polos en las ranuras 5 y 14, como se puede ver en la figura 252, los que deben estar distanciados del paso polar, que vale:

$$\frac{Z}{p} = \frac{18}{2} = 9 \text{ ranuras}$$

lo que es fácil comprobar. A cada lado de los ejes polares se reparten las ranuras que deben quedar libres, que son 6 en total, o sea 3 por polo. Se dejan las 4, 5 y 6 para un polo y las 13, 14 y 15 para el otro.

En las ranuras restantes se dibujan las 6 bobinas por polo, que se pueden hacer con paso igual al polar o menor, llamándose en este último caso, bobinas de paso corto. En la figura las hemos trazado con el paso polar, por lo que se une el lado superior de la ranura 1 con el inferior de la 10 por arriba y por abajo de las ranuras, y así sucesivamente, un lado superior con otro inferior que está 9 ranuras más adelante, hasta formar los dos grupos de seis bobinas que corresponden uno a cada polo.

Ahora se deben conectar las bobinas entre sí, de modo que la corriente siga siempre un mismo sentido, por lo que, partiendo de un lado que suponemos de entrada, como el superior de la ranura 7, seguimos al inferior de la 16 y lo unimos con el superior de la bobina siguiente, es decir, el superior de la ranura 8.

Se sobrentiende que la unión la hacemos con el terminal de la primera bobina y el inicial de la segunda, para que la corriente recorra todas las espiras del haz de conductores que forman la bobina. Así siguiendo, se une el inferior de la ranura 17 con el superior de la 9; el de abajo de la 18 con el de arriba de la 10, etc., hasta llegar al conductor inferior de la ranura 3, que es el final de la primera sección del bobinado.

La segunda sección comienza en el conductor superior de la ranura 16, que va al inferior de la 7 y que se une al superior de la 17 y así siguiendo hasta llegar al inferior de la ranura 12 donde termina la segunda sección del bobinado, no habiendo más por tratarse sólo de dos polos.

Falta ahora conectar entre sí las dos secciones, lo que debe hacerse de manera que se inviertan los sentidos de corrientes de una con respecto a la otra, para tener distintas polaridades magnéticas. Por este motivo, unimos el fin de

la sección primera, que estaba en el conductor inferior de la ranura 3, con el fin de la sección segunda, que estaba en el fondo de la ranura 12, cosa que hemos indicado en la figura con el puente *aa*. La salida del bobinado completo está en el comienzo de la segunda sección, ranura 16, y la hemos indicado con S.

Los puentes entre las bobinas de una misma sección no se hacen en la realidad tan largos como parecería observando la figura, pues los dos terminales de cada bobina se encuentran juntos, saliendo del paquete de conductores que forman la bobina encintada. En el dibujo se ha utilizado la representación que permitió resaltar tales conexiones en la forma más clara posible.

En las ranuras vacías se ubicaría la fase auxiliar, que es del mismo tipo o sino se hará en madeja o en cadena. Para no aumentar la confusión de la

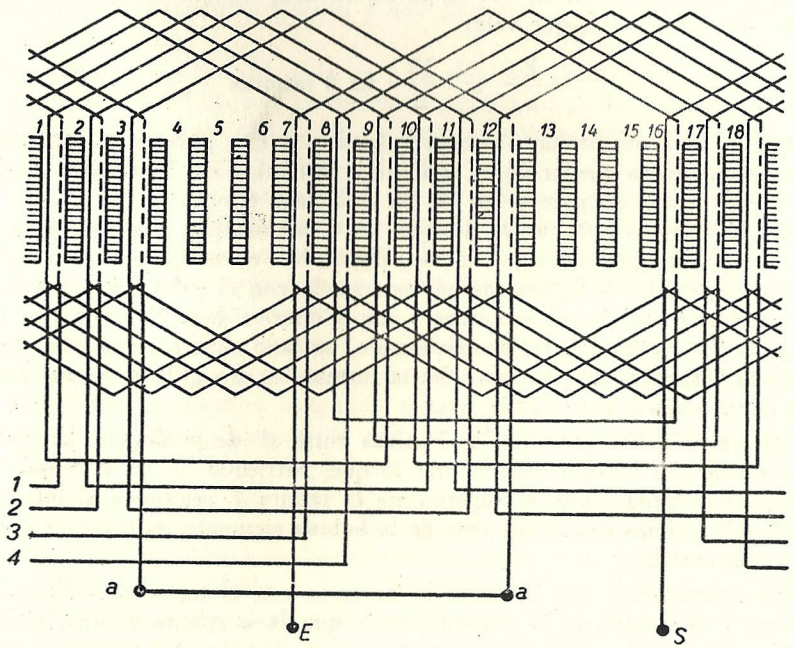

FIG. 252. — Bobinado monofásico progresivo de dos polos.

figura no la hemos incluído, pero si ella también es progresiva será ejecutada en idéntica forma que la fase principal, de modo que no habrá más que copiar una mitad del bobinado completo y colocarlo en las ranuras que han quedado libres en la figura 252. Puede tener menor cantidad de bobinas que una mitad del principal. Si fuera de cualquiera de los otros tipos de bobinados descriptos anteriormente, no hay más que acudir a los esquemas dados en esa oportunidad para completar el ejemplo práctico.

Los bobinados progresivos para máquinas de mayor número de polos se realizan en idéntica forma que el de dos polos, con la salvedad que habrá

tantas secciones del devanado como polos tenga el motor, las que se conectarán en serie entre sí cuidando de cruzar alternadamente las conexiones.

Las uniones de bobinas de una misma sección entre sí se hacen en la misma forma, de modo que la corriente mantenga un sentido de circulación igual en toda la sección correspondiente a un polo.

Al aumentar el número de polos el esquema se hace muy engorroso, de modo que omitimos un ejemplo numérico de casos de máquinas multipolares, porque con el dado se puede extender el problema sin dificultad apreciable. Además, dijimos que son más frecuentes los bobinados de cualquiera de los otros dos tipos que los progresivos, pese a que éstos tienen la ventaja de poder hacer todas las bobinas con una misma forma o molde, lo que abarata la mano de obra.

CAPÍTULO XXIV

BOBINADOS DE MOTORES UNIVERSALES

Recordaremos, por haberlos tratado en el capítulo IX, que los motores universales eran los que podían funcionar indistintamente con continua o alterna, es decir, con ambas corrientes. Conocido pues su funcionamiento, nos ocuparemos ahora del bobinado de los mismos.

Los devanados de los inductores se hacen concentrados, como en los de corriente continua, formando electroimanes con núcleos polares laminados. Generalmente son de dos polos, salvo algunos casos en que se colocan cuatro.

Los números de espiras son variables desde 250 hasta 550 para los diversos tipos existentes, y se hacen con alambre de diámetro entre 0,15 y 0,45 milímetros. En una tabla daremos las características particulares de algunos motores comunes.

El devanado del rotor es casi siempre del tipo imbricado, con igual número de bobinas que delgas tenga el conmutador o colector. El número de ranuras del rotor es reducido y frecuentemente igual a la mitad del número de delgas, por lo que habrá bobinas colocadas en dos capas superpuestas. Si el devanado es en doble capa, que es el más común, se encontrarán en cada ranura dos lados de bobina correspondientes a cada capa, de modo que cada paquete estará formado por dos bobinas, con cuatro terminales, dos de cada una de ellas.

Las bobinas son de espiras múltiples, en gran cantidad, y las conexiones al colector se hacen con el principio y fin de cada bobina. El objeto de tener muchas delgas en el colector es mejorar la conmutación, porque se reduce la tensión entre dos delgas sucesivas.

El devanado se hace casi siempre con paso reducido (ver capítulo XII), un poco menor que el polar, que es la cantidad de ranuras que media entre los ejes de dos polos inmediatos. Como la mayoría de los motores universales son bipolares, el paso polar será igual a la mitad del total de ranuras del rotor, y el paso de bobina una ranura menor más o menos.

El paso de colector es generalmente igual a una ranura, como en todos los

devanados imbricados o paralelo, y las escobillas tienen ubicación diametral. Si el motor es de cuatro polos, la posición diametral es de carácter eléctrico para cada par de escobillas, que se unen en paralelo dos a dos, tomando pares opuestos.

Las consideraciones generales sobre devanados de corriente continua se pueden extender a este tipo de bobinados, por lo que no nos extenderemos sobre un tema ya tratado en el tomo correspondiente. La particularidad de estos motores es la uniformación adoptada en los devanados, que se hacen casi de un solo tipo para los usos corrientes, de modo que se puede estudiar el caso de muchos motores con un solo ejemplo práctico que resuma las características generales de los mismos.

Daremos, de todos modos, una tabla con las características de los devanados usuales de motores universales, para simplificar la tarea del bobinador en las reparaciones. La tabla incluirá los datos referentes a los inductores, a fin de hacerla más completa. Se sobreentiende que en ella no estarán comprendidos todos los tipos existentes sino los más comunes.

Ejemplo de un devanado para rotor

Supongamos un inducido del motor universal de un aspirador de polvo o un taladro portátil, en el que se debe trazar un bobinado imbricado de dos polos, lo que es más común. Los datos son los siguientes:

número de polos	2
número de ranuras del rotor	12
número de delgas del colector	24
número de escobillas	2

Con los cuales se debe determinar el diseño a adoptar para el devanado y efectuar el trazado del mismo.

Calculemos en primer lugar el número de bobinas y los pasos, así como el número de lados de bobina que debe haber en cada ranura. Procediendo en orden:

Número de bobinas: es igual a la cantidad de delgas del colector, o sea:

$$24 \text{ bobinas}$$

Lados de bobina por ranura: como cada bobina tiene dos lados, y tenemos en total 24 bobinas, es decir, 48 lados de bobina, se tendrá que en cada ranura irán:

$$\frac{48}{12} = 4 \text{ lados de bobina}$$

puesto que se tienen 12 ranuras en el inducido.

Pasos: el paso polar es igual al cociente entre el total de ranuras y el

número de polos. En nuestro caso hay 12 ranuras y 2 polos, de manera que el paso es:

$$\text{paso polar} = \frac{12}{2} = 6 \text{ ranuras}$$

Como se trata de un bobinado imbricado, habrá dos pasos: uno en avance y otro en retroceso. La diferencia entre ambos es el paso resultante, que es igual a 1 en este tipo de devanados, y como hemos dicho que el paso de bobina se tomaba algo menor que el polar, adoptamos un paso elemental de avance de:

$$\text{paso elemental de avance} = 5 \text{ ranuras}$$

puesto que el paso polar es igual a 6 ranuras. El paso elemental de retroceso debe ser tal que restándolo al de avance quede una ranura, de modo que:

$$\text{paso elemental de retroceso} = 4 \text{ ranuras}$$
$$\text{paso resultante} = 5 - 4 = 1 \text{ ranura}$$

Trazado del bobinado

En la figura 253 se puede ver el devanado propuesto. Se trata de dos bobinados superpuestos simples, puesto que en cada ranura se encuentran dos lados de bobina pertenecientes a una serie y dos lados de la otra. Para el dibujo

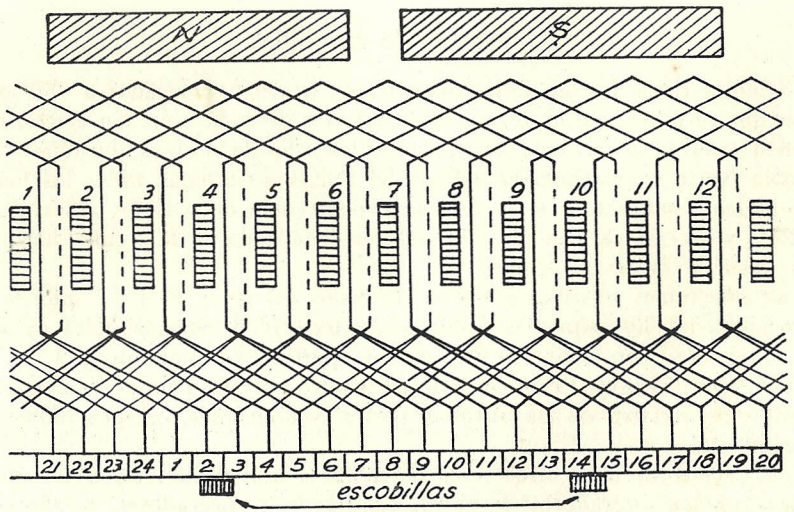

FIG. 253. — Bobinado del rotor de un motor universal.

no es posible representar esto sin complicarlo excesivamente, de modo que solo se ha dibujado un lado con línea llena y otro con línea punteada. La línea llena representa los dos lados de bobina superiores y la línea punteada los

dos inferiores, en el fondo de la ranura. En la parte inferior del dibujo, entre el inducido v el colector se ven las dos cabezas de bobinas distintas. En realidad, las dos bobinas se suelen envolver juntas en un mismo encintado, y sólo se reconoce que se trata de un par por la cantidad de terminales que son 4, dos para cada una de ellas.

Para trazar las bobinas se une siempre un lado superior con otro inferior que diste del primero una cantidad de ranuras igual al paso correspondiente. Así el paso de avance, que lo formamos por la parte superior, comprende 5 ranuras, luego el lado superior de la ranura 1 se une al inferior de la ranura 6. El paso de retroceso es 4 ranuras, de modo que del lado inferior de la ranura 6 volvemos al superior de la ranura 2, formando una espira completa.

En esta forma se avanza progresivamente a lo largo de la periferia del rotor, uniendo el lado superior de la ranura 2 con el inferior de la 7 y éste con el superior de la 3, tanto para una bobina como para la otra de las ranuras citadas.

La única diferencia aparece en las conexiones al colector. En efecto, en la mitad de las conexiones inferiores se debe unir la bobina a una delga del colector. Así las dos bobinas que abarcan las ranuras 1 y 6 se conectan a las delgas 1 y 2 del colector, en la forma que se ve en la figura, una bobina a cada delga.

Hacemos notar que en la parte superior no se han hecho ver las dos cabezas de bobina como en la parte inferior para no complicar la figura, pero debe aceptarse que todas las bobinas son dobles.

Ubicación de escobillas

El motor tiene dos escobillas diametrales, es decir, colocadas a 180° entre sí, las que se ubican en el devanado en los ejes de cada polo. En efecto, si se suponen sentidos de corriente ascendente en los lados de bobinas ubicados debajo del polo Norte y descendentes debajo del Sur, y se colocan todas las flechas para indicar estos sentidos, se verá la concurrencia de sentidos a las escobillas 2 - 3 y 14 - 15 para la posición del rotor indicada en la figura, luego esa es la posición de las escobillas.

Las conexiones relativas entre el devanado del rotor y el del inductor se hacen siguiendo los esquemas dados con anterioridad, conectándolos en serie, pero de acuerdo con lo que se dijo en esa oportunidad (capítulo IX).

La figura 254 muestra un corte de un taladro portátil a fin de ilustrar sobre la ubicación relativa de las distintas partes componentes, campos inductores, inducido, etc.

Los devanados para otros tipos de motores universales, como los que se emplean en los aspiradores de polvo, ventiladores, enceradores, secadores de cabello, batidores, etc., son en todo similares al propuesto, variando en la cantidad de ranuras, de delgas o de conductores de cada bobina del estator o del rotor, pero el procedimiento de trazado es común a todos ellos, por lo que el ejemplo puede servir de guía para el bobinador.

Sobre los bobinados de los motores de repulsión y otros, léase el capítulo IX.

Características de motores universales

En la tabla que sigue, se resumen los datos más importantes de algunos motores universales utilizados en aparatos de uso corriente. En ella se da el número de ranuras del rotor, de delgas del conmutador y de bobinas del rotor. Se entiende que en cada ranura van 4 lados de bobina, aunque dos de ellos pueden unirse formando un paquete, pero independizando sus terminales. Figura también la cantidad de espiras de cada bobina y el diámetro del conductor empleado, tanto para las bobinas del rotor como para las del inductor, es decir, las bobinas de campo, suponiendo en todos los casos motores bipolares.

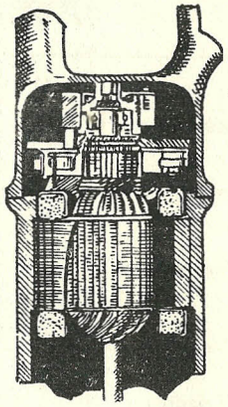

FIG. 254. — Corte de un taladro de mano con motor universal.

Como se ve en el cuadro, la mayor parte de los motores tienen sólo un devanado del inductor, salvo algunos ventiladores, que como deben funcionar en peores condiciones y durante períodos más prolongados, se les hace doble bobinado, uno para corriente continua y otro para alternada. Las derivaciones de los bobinados únicos suelen hacerse en la mitad del devanado, y se llevan al selector de clase de corriente que debe ser accionado cuando el motor se cambia de red de conexión únicamente.

Los devanados que figuran en la tabla no son los únicos, pues se encuentran otros tipos con distintas características, pero con los datos propuestos se puede encarar el trazado de bobinados para cualquier modelo, por comparación.

Veamos cómo se usa la tabla que sigue. Supongamos que tenemos un pequeño taladro portátil que tiene 18 ranuras en el rotor, y que sabemos debe funcionar indistintamente con corriente continua o con alternada. Comprobamos, además, que el colector tiene 36 delgas.

Entramos en la tabla con estos dos datos, que en realidad forman uno solo, y vemos que tenemos que hacer 36 bobinas. Éstas tendrán 72 lados de bobina, los que deben ubicarse a razón de cuatro lados por cada ranura, pues sólo tenemos 18 ranuras. Esto puede verse en la figura 253. El paso a cumplir con las bobinas es de 8 ranuras, según lo indica la tabla. Pasemos ahora a la ejecución del bobinado.

El alambre a emplear tendrá 0,45 mm de diámetro, y deben darse 20 espiras en cada bobina, para cumplir con los datos suministrados por la tabla.

Con respecto al estator, o sea a los campos inductores, los haremos con dos bobinas iguales, de 540 espiras cada una, usando alambre de 0,5 mm de diámetro.

Como se ve, resulta muy simple rebobinar un motorcito mediante el empleo de la tabla siguiente, en la cual se encuentran muchos de los usuales. Al final de la misma se da una recomendación de interés.

Tabla de características de motores universales comunes

Motores para	Datos del rotor o inducido						Datos del estator o inductor	
	Número ranuras del rotor	Número delgas colector	Número bobinas del rotor	Paso	Número espiras por bobina	Diámetro del alambre (mm)	Número espiras de cada bobina	Diámetro del alambre (mm)
Aspiradores	11	22	22	5	40	0;25	250	0,40
	12	24	24	5	45	0,25	250	0,45
	12	24	24	5	50	0,22	275	0,30
	13	26	26	6	50	0,18	300	0,40
Ventiladores	12	24	24	5	20	0,18	c.c. 500 c.a. 250	0,18 0,28
	12	24	24	5	30	0,16	c.c. 750 c.a. 375	0,16 0,35
Taladros	12	24	24	5	40	0,22	220	0,45
	18	36	36	8	20	0,45	540	0,50
Enceradores	12	24	24	5	50	0,22	275	0,40
Secadores	12	24	24	5	65	0,18	360	0,32
Motorcitos	16	32	32	7	125	0,16	500	0,38

Es conveniente que el bobinador se confeccione una tabla en la que, además de las cifras dadas más arriba, vaya agregando las características de los motores que se le presenten para efectuar reparaciones o simplemente revisiones, de modo de formar un archivo completo de bobinados de motores universales, con el que podrá resolver en cualquier momento un problema referente a los mismos.

CAPÍTULO XXV

CÁLCULO DE BOBINADOS DE ALTERNA

Los trazados de bobinados vistos en capítulos anteriores han permitido ver cómo se ejecutaban para cada uno de los casos tratados, haciendo abstracción de la cantidad de espiras que formaban cada bobina, salvo en el caso de los de barras que tienen una sola espira. Sabemos que todas las espiras de una bobina son iguales, y forman el paquete encintado que irá colocado en las ranuras del estator o del rotor, según el caso. El problema que queda es determinar esa cantidad de espiras por bobina, el diámetro del alambre con que se hace el bobinado y la comprobación de si la máquina se comportará de acuerdo con lo que se especifica.

Cuando se trata de un rebobinaje común, la tarea del proyectista se simplifica, pues conocido el trazado del bobinado no tiene más que copiar el bobinado deteriorado, supuesto que pueda contarse la cantidad de espiras por bobina y verificar la sección del alambre. Si el rebobinaje se hace para cambiar características, nos remitimos al capítulo siguiente. En general, trataremos en esta oportunidad el caso de un estator al que debe hacérsele un bobinado que permita el funcionamiento dentro de condiciones de tensión, potencia y velocidad fijadas de antemano.

Para la fábrica de motores eléctricos el cálculo representa una tarea de proyecto y otra de verificación en laboratorio, pero para el bobinador el asunto es diferente, pues debe resolver distintos problemas para cada motor y no diseñar un prototipo en el cual se invierte tiempo y dinero para luego construir muchas unidades iguales. Por esa razón, daremos el procedimiento de cálculo de un bobinado en forma general, no aplicable a las fábricas sino al taller de bobinados y rebobinajes. Claro que el principio es único, y puede ser adaptado al proyecto de una serie de motores, con las debidas comprobaciones y mediciones.

Normas generales para el cálculo

Un motor de alterna debe cumplir una serie de condiciones para que su funcionamiento pueda considerarse aceptable. Si una vez rebobinado se comporta dentro de ciertos límites que lo acercan a las condiciones teóricas, puede estimarse que el trabajo está bien hecho. Las pequeñas diferencias en el rendimiento, factor de potencia, corriente absorbida de la red, etc. se aceptan porque no es posible repetir con mayor exactitud las cifras originales de fábrica.

Por ejemplo, si el factor de potencia es bajo, puede deberse a una excesiva separación entre rotor y estator. Esto no puede corregirse pero sí es posible la condición inversa, es decir, repasar el entrehierro cuando el factor de potencia lo permite. En tal caso puede hacerse necesario aumentar un poco la cantidad de espiras para compensar la disminución del flujo magnético por aumento de entrehierro. Claro que el mayor número de espiras reduce la corriente de arranque y con ello la cupla, de modo que vemos de qué manera deben tenerse en cuenta los factores intervinientes.

En general, puede postularse que el aumento del número de espiras reduce la corriente y la cupla de arranque, y puede aumentar el rendimiento y el factor de potencia. En principio, equivale a un aumento de la tensión. Pero en todos los casos, el número de espiras es la cifra más importante a que debe llegar el cálculo, aunque suele trabajarse con la cantidad de conductores por ranura y no con la de espiras por razones de costumbre.

La segunda cifra de interés importante es la sección o el diámetro del alambre con que se hacen esas espiras, la que debe estar relacionada con la corriente circulante y con las dimensiones de la ranura. Lo primero por razones de calentamiento del bobinado y lo segundo por razones de posibilidad de ubicación dentro de cada ranura.

Para determinar ambas cosas hay que conocer:

1) Las dimensiones del paquete de chapas que forma el estator, que son los diámetros externo e interno, las medidas de dientes y ranuras y la longitud axial del paquete. Lógicamente, también el número de ranuras.
2) La densidad del campo magnético admisible en el hierro o sea la inducción magnética normal y la de saturación o máxima permisible en los dientes.
3) La potencia, tensión y corriente normales del motor, cifras vinculadas entre sí por la expresión general de la potencia.
4) La velocidad de giro del rotor, que para cada frecuencia depende del número de polos con que se haga el bobinado.

Con la información que antecede se procede a encarar el cálculo, y a verificar luego las condiciones de funcionamiento, saturación magnética, etc. Es decir que hay distintas etapas que pueden enumerarse así:

a) Determinación de la potencia obtenible con un núcleo dado.
b) Cálculo de la cantidad de conductores activos por ranura.
c) Cálculo de la sección de esos conductores.
d) Comprobación de la saturación magnética.

Haciendo la salvedad de que el orden de esos cálculos puede ser alterado, pero que no debe omitirse ninguno de los cuatro puntos fundamentales en el diseño del bobinado; luego viene el trazado, cosa que hemos estudiado en los capítulos anteriores.

Determinación de la potencia obtenible

Esta apreciación se apoya en datos empíricos obtenidos de las fábricas de motores eléctricos, y tiene un carácter estimativo. La fórmula a aplicar es:

$$P = k\ d^2\ L\ n\ 10^{-6}$$

En la que la potencia P se expresa en caballos (C.V.) y las demás letras significan:

k es un coeficiente empírico que depende del número de polos y del paso polar del motor, que como sabemos vale:

$$y_p = \frac{3{,}14\ d}{p}$$

en la que se toma el paso polar en centímetros, el diámetro del estator, *d*, en cm y *p* es el número de polos (*d* está indicado en la figura 255). Los valores de *k* se dan en la siguiente tabla:

Valores del coeficiente k

Paso polar cm	Valores de k para p =			
	4 polos	8 polos	12 polos	16 polos
12	—	1,6	1,7	1,7
18	2,1	2,1	2,1	2,1
25	2,1	2,5	2,5	2,5
30	2,5	2,8	2,8	2,8
40	2,8	3,1	3,1	3,1
50	2,9	3,2	3,2	3,2

Aclarándose que se deben tomar las cifras más próximas a las de la tabla, y que para motores muy chicos no aparecen los valores porque no se hace la estimación de potencia.

Sigamos con la fórmula que da la potencia:

d es el diámetro interior del estator, tomado en centímetros (fig. 255).

L es la longitud axial del paquete de chapas, también en cm.
n es el número de revoluciones por minuto del rotor.

Para un estator que debe bobinarse, se determina la potencia obtenible y se compara con la cifra pedida, prosiguiendo luego con el cálculo. Muchas

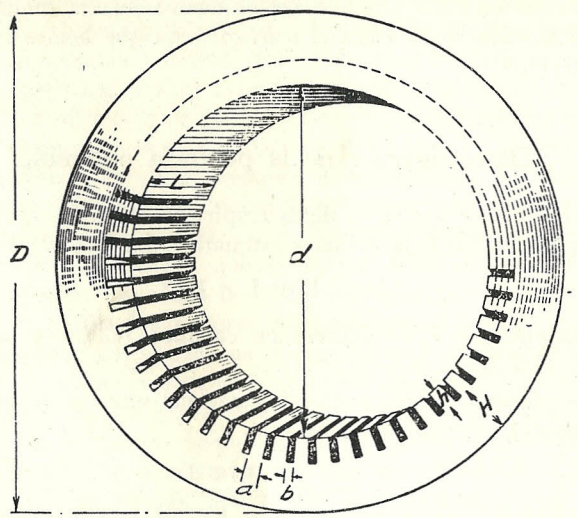

FIG. 255. — Dimensiones magnéticas de las chapas del estator para calcular el bobinado.

veces se omite parte de los cálculos por tratarse de motores conocidos en los cuales se sabe que las cosas andarán bien.

Cálculo del flujo magnético

Es éste el dato inicial para calcular el bobinado, y para determinarlo hay que estudiar previamente el circuito magnético. La figura 255 nos muestra indicadas las dimensiones típicas a tener en cuenta, tomándose todas en centímetros. Lo primero a tener en cuenta es la inducción magnética admisible en el núcleo y en los dientes. Las cifras son:

Inducción normal en el núcleo: 12.000 — 14.000 líneas/cm^2
Inducción de saturación permisible: 20.000 líneas/cm^2

Entendiéndose que para los cálculos de un bobinado tomaremos siempre 12.000 líneas por centímetro cuadrado para contemplar prudentemente el problema, y que al verificar la inducción máxima de los dientes saturados no debe sobrepasarse la cifra de 20.000 líneas por centímetro cuadrado en los más desfavorables.

Veamos ahora la expresión general que nos da el flujo magnético por polo del estator:

$$\Phi_p = \frac{45\ E_f\ 10^6}{f\ Z\ k_1\ k_2}$$

En cuya expresión E_f es la tensión de fase del bobinado, que si es en triángulo es la de línea, y si es en estrella debe dividirse a la tensión de línea por 1,73. La frecuencia f se toma en c/s, y vale generalmente 50 c/s. Z es el número total de conductores activos por fase. k_1 es el factor de distribución, que vale 0,95 para bobinados trifásicos. k_2 es el factor de bobinado, que se calcula de la siguiente manera:

Recordemos que el paso con que se ejecutaba el bobinado, contado como número de ranuras, era menor que el polar, por no haber ventaja en alargar las conexiones. Se tomaba generalmente unos cinco sextos del paso polar, en cantidad de ranuras. Bien, si llamamos:

$$N_p = \text{paso polar} = \frac{N}{p} = \frac{\text{total ranuras}}{N^\circ \text{ polos}}$$

$N_1 = N^\circ$ de ranuras que restan entre el paso de bobina y el polar

Se puede calcular con suficiente aproximación el factor de bobinado con la expresión:

$$k_2 = \sqrt{1 - 2\left(\frac{N_1}{N_p}\right)^2}$$

Con lo que, conocidos los términos que intervienen en la fórmula que da el flujo, se podría calcularlo, pero esta fórmula, en realidad, nos servirá para determinar el número de conductores activos que tendrá el bobinado.

Ahora, con las dimensiones indicadas en la figura 255 podemos calcular el flujo magnético por polo. En efecto, sean:

H = dimensión radial de la corona o parte sin dientes de la chapa.
h = profundidad de la ranura.
a = ancho del diente.
b = ancho de la ranura.

Todas estas medidas son en centímetros. Es evidente que se cumple:

$$H + h = \frac{D - d}{2}$$

La sección neta de hierro que interviene en el cálculo del flujo se deduce de la figura 255 y de la 256. El flujo de una bobina se abre en dos mitades, una para cada lado, de manera que para el cálculo todo ocurre como si por la corona de hierro pasara la mitad de flujo, o como si ella tuviera el doble de sección. Tomando este último criterio, que es más cómodo, y recordando

que el flujo es igual a la inducción magnética por la sección transversal, se tiene:

$$\text{sección} \quad S = 2\,H\,L$$
$$\text{flujo} \quad \Phi_p = B\,S$$

En la que, como las dimensiones se conocen, y para la inducción tomamos 12.000 líneas, puede calcularse perfectamente el flujo por polo. La sección ha resultado en centímetros cuadrados.

Verificación de la saturación de los dientes

En cuanto se tienen las dimensiones de las ranuras y dientes, por haberlas medido, podemos verificar si no se producirá en los segundos saturación magnética por encima de los límites fijados. Pero para ello observemos la figura 257 que nos muestra en forma esquemática el conjunto de ranuras y dientes que corresponden a un polo del estator. Suponemos, y en ello hay una aproximación aceptable en la práctica, que el flujo magnético tiene, a lo largo del desarrollo del estator, una distribución sinusoidal, lo que corresponde al gráfico superior de la figura. Luego, si hay saturación, ella se producirá en los dientes que quedan en la zona central. El flujo que hemos obtenido del cálculo es alternado, y por consiguiente admite la función sinusoidal, y para verificar la saturación debemos tomar la amplitud o valor máximo de ese flujo.

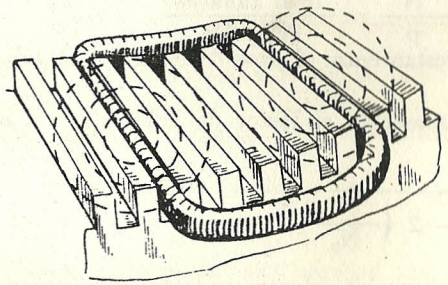

FIG. 256. — El flujo magnético se reparte en dos mitades, una hacia cada lado de la bobina, por lo que debe tomarse el doble de la sección neta de hierro.

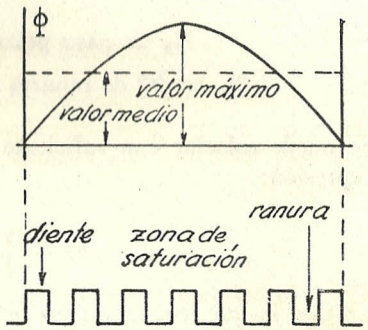

FIG. 257. — Para verificar la saturación magnética en los dientes se tiene en cuenta una distribución sinusoidal del flujo de cada polo.

El resultado de los cálculos del flujo por polo nos da un valor medio que corresponde sólo a medio ciclo (ver capítulo II), y sabemos que el promedio de las alturas de media sinusoide es:

$$\Phi_M = 0{,}637\ \Phi$$

o, lo que es lo mismo:

$$\Phi = 1{,}57\ \Phi_M$$

Por otra parte la cantidad de dientes por polo es igual al total de dientes, coincidente con el total de ranuras, N, dividido por el número de polos:

$$N_p = \frac{N}{p} = \text{paso polar}$$

Y la sección neta de hierro, en sentido transversal, como corresponde al sentido en que las líneas del campo magnético la atraviesan, vale:

$$S = a\,L$$

Según figura 255, y tomando un solo diente, que consideramos el más desfavorable, la inducción en el mismo vale, tomando el valor de cresta o máximo

$$B_m = \frac{1{,}57\ \Phi_p}{a\ L\ N_p}$$

cifra que debe resultar inferior a 20.000 líneas por cm².

Cantidad de conductores por ranura

Habiendo determinado el valor del flujo por polo, y conociendo los demás datos del motor, podemos calcular la cantidad total de conductores activos por fase, mediante una fórmula que deducimos de la primera expresión que daba el flujo:

$$Z = \frac{45\ E_f\ 10^6}{f\ \Phi_p\ k_1\ k_2}$$

En cuya fórmula conocemos las letras por haberlas explicado en las páginas anteriores. En cada ranura irá un número de conductores menor, ya que si hay N ranuras y 3 fases, se tiene que vale:

$$z = \frac{3\ Z}{N} \text{ (conductores por ranura)}$$

Expresión final que nos da el número de conductores por ranura del estator. Las conexiones de estos conductores entre sí es cosa que tratamos al ocuparnos de los bobinados.

Sección de los alambres del bobinado

El conocimiento de las características eléctricas del motor nos permite deducir la sección necesaria para los alambres cuya cantidad por ranura ya hemos calculado. Los datos a tener en cuenta son:

P = potencia del motor en C.V.
E_f = la tensión por fase en Volt
r = el rendimiento en cifras decimales
$\cos \varphi$ = el factor de potencia
I_f = la intensidad de corriente por fase en Amper.

Claro que esta última cifra es la más importante para nuestros cálculos, pero puede determinarse conociendo todos los otros datos mediante la expresión conocida:

$$I_f = \frac{736\ P}{1{,}73\ E_f\ r\ \cos\varphi}$$

Una vez que conocemos la corriente que pasará por el alambre de una fase del bobinado podemos determinar la sección transversal del mismo para soportar esa corriente. La densidad de corriente se adopta de

$$\delta = 2{,}5 - 3\ A/mm^2$$

Y la sección del conductor vale:

$$s = \frac{I}{\delta}\ (mm^2)$$

Con lo que se determina de inmediato el diámetro del alambre. Falta ver ahora si en la ranura caben todos los alambres que hemos de colocar. La dimensión de la ranura, en sentido transversal, según lo indica la figura 258 vale:

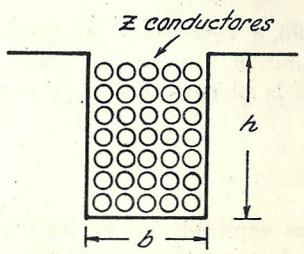

Fig. 258. — Ubicación de los conductores en la ranura del estator.

$$b\ h$$

Tomando en esta ocasión las dos medidas en milímetros, pues el diámetro del alambre está en mm y la sección s en mm^2. Se debe verificar que:

$$1{,}5\ z\ s < b\ h$$

Es decir que la sección total de cobre supere en un 50 % al hueco de la ranura para tener en cuenta la aislación, etc.

Ejemplo numérico

Tal como lo hemos dicho en diversas oportunidades, calcularemos un motor para alterna, que debe ser rebobinado con los siguientes datos:

Potencia necesaria: 40 C.V.
Velocidad necesaria: 725 r.p.m.
Tensión por fase: 380 V.

Dimensiones según fig. 255:

d = 43 cm; L = 25 cm; H = 6 cm; h = 3 cm; a = 1,2 cm
b = 1,4 cm; N = 48 ranuras

Datos adoptados para nuestro cálculo:

rendimiento r = 0,90
factor de potencia cos φ = 0,8
factor de distribución k_1 = 0,95
paso del bobinado: 6 ranuras

Procedemos a efectuar los cálculos. Lo primero es verificar si podemos esperar obtener 40 C.V. con este motor. Para ello calculamos el paso polar; teniendo en cuenta que para 725 r.p.m. o sea 750 r.p.m. de velocidad sincrónica el número de polos es 8:

$$\frac{3{,}14\ d}{p} = \frac{3.14 \times 43}{8} = 17\ cm$$

Luego hay que determinar el coeficiente *k* mediante la tabla y resulta, para un paso polar de 17 cm, (tomamos 18 cm) y 8 polos un valor:

$$k = 2{,}1$$

Con lo que se puede calcular la potencia obtenible:

$$P = k\ d^2\ L\ n\ 10^{-6}$$

$$P = \frac{2{,}1 \times 43 \times 43 \times 25 \times 725}{1.000.000} = 59\ C.V.$$

Es decir que con nuestro estator podemos perfectamente llegar hasta 59 caballos, cifra mayor que la pedida.
Veamos ahora el cálculo del flujo magnético. Las dimensiones de los dientes y ranuras deben responder geométricamente a la condición deducida de la fig. 255:

$$a + b = \frac{3{,}14\ d}{N}$$

y en nuestro caso resulta:

$$\frac{3{,}14 \times 43}{48} = 2{,}8\ cm = 1{,}2 + 1{,}4\ (cm)$$

El flujo por polo resulta, tomando una inducción de 12.000 líneas:

$$\Phi_p = 2\ B\ H\ L$$

$$\Phi_p = 2 \times 12.000 \times 6 \times 15 = 2.160.000$$

Verifiquemos la saturación en los dientes. Se emplea la fórmula que nos da la inducción máxima en el diente más desfavorable; tenemos 6 ranuras por polo:

$$B_m = \frac{1{,}57\ \Phi_p}{a\ L\ N_p}$$

$$B_m = \frac{1{,}57 \times 2160000}{1{,}2 \times 25 \times 6} = 20.000$$

Resultando igual que las 20.000 líneas que es el máximo permisible. Ahora podemos pasar a calcular el número de conductores activos. Primero calculemos el factor de bobinado. Si el paso de bobinado es 5 ranuras y el polar es 6 ranuras, restan entre una y otra cifra:

$$N_1 = 6 - 5 = 1$$

Con lo que aplicamos la fórmula empírica para calcular ese factor:

$$k_2 = \sqrt{1 - 2\left(\frac{N_1}{N_p}\right)^2}$$

$$k_2 = \sqrt{1 - 2\left(\frac{1}{6}\right)^2} = 0{,}97$$

Ahora pasamos a calcular el número total de conductores activos por fase, de acuerdo con la fórmula ya vista:

$$Z = \frac{45\ E_f\ 10^6}{f\ \Phi_p\ k_1\ k_2}$$

$$Z = \frac{45 \times 380 \times 1000000}{50 \times 2160000 \times 0{,}95 \times 0{,}97} = 172$$

Y de inmediato podemos determinar el número de conductores que van en cada ranura, que es:

$$z = \frac{3\ Z}{N} = \frac{3 \times 172}{48} = 11$$

La intensidad de corriente que tomará el motor por fase se puede determinar de inmediato con ayuda de la expresión:

$$I_f = \frac{736\ P}{1{,}73\ E_f\ r\ \cos\varphi}$$

$$I_f = \frac{736 \times 40}{1{,}73 \times 380 \times 0{,}9 \times 0{,}8} = 62\ A.$$

Con lo que, dada la densidad de 3 Amper por milímetro cuadrado tendremos una sección de conductores de:

$$s = \frac{62}{3} = 20\ mm^2$$

Alambre al cual corresponde un diámetro de 5 mm. Veamos si caben en la ranura los 11 alambres:

$$z\ s = 11 \times 20 = 220\ mm^2 \text{ ocupa el cobre}$$
$$b\ h = 14 \times 40 = 640\ mm^2 \text{ disponibles en la ranura}$$

Lo que nos dice bien claro que no habrá problema.

CAPÍTULO XXVI

CAMBIOS DE TENSIONES, POLOS Y FASES

El cálculo, trazado y ejecución del bobinado de un motor o generador para corriente alternada no siempre se hace en una máquina nueva, o en una existente, repitiendo el diseño original. Son numerosas las ocasiones en que se debe rebobinar un motor para cambiar sus características, ya sea la tensión de línea, la velocidad de giro o el número de fases. Los cambios de otras características son menos frecuentes y su posibilidad es problemática; por ejemplo, puede reducirse la potencia pero generalmente no es fácil aumentarla, y cabe preguntarse para qué se desea reducirla. El cambio de fases queda casi siempre limitado a la transformación de motores trifásicos en monofásicos y viceversa.

Resumiendo, abordaremos los casos de cambio de tensión, de velocidad y de fases, siendo lo segundo equivalente al cambio del número de polos. Por razones de ordenamiento, trataremos primero el cambio de tensión.

Generalidades sobre el cambio de tensión

La f.e.m. inducida por espira del bobinado es una cifra característica de cada motor, y está ligada al circuito magnético y a la velocidad de giro. Luego, en principio, cuando debe cambiarse la tensión a que se conectará un motor, se fijará como cifra clave la *tensión por espira*. Mientras mantengamos esa cifra constante, todos los cambios son posibles, salvo el detalle del aislamiento del bobinado.

Aparece así el segundo factor que debe tenerse en cuenta. Es cierto que a cada espira le tocará la misma tensión que en el bobinado anterior, pero la tensión total de la línea está aplicada a la caja de bornes, esto es, al total del bobinado, y es fácil deducir que si reducimos la tensión no habrá problema, pero si la aumentamos, puede haberlo.

Felizmente, la verificación del aislamiento es simple, pues basta comprobar

con un megóhmetro que la aislación entre el alambre vivo y masa sea igual o mayor que 1000 veces la tensión de régimen.

Veamos ahora la otra consideración, que se refiere a la tensión por espira. Estudiando un bobinado, puede encontrarse que el mismo está formado por secciones, casi siempre en serie y algunas veces en paralelo. En general, observando la figura 259, podemos estipular cuáles son las posibilidades de cambiar la tensión de bornes en un bobinado sin rehacerlo. En el caso de la figura tenemos cuatro secciones en serie, entendiendo que eso pasa para todas las fases (el dibujo corresponde a un bobinado monofásico). Cambiando las conexiones podemos conectar el bobinado a tres tensiones distintas, cada una de las cuales es doble de la siguiente. Claro que este caso no es de los más comunes, pero habla bien a las claras del procedimiento por el cual se estudia la posibilidad.

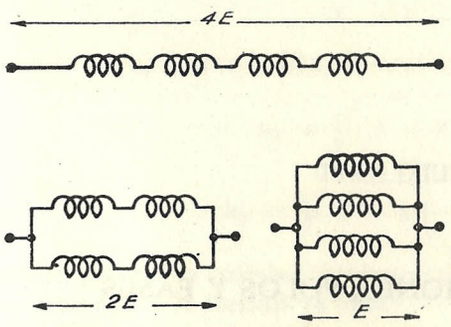

FIG. 259. — Un bobinado con cuatro secciones iguales en serie por fase da tres posibilidades de conexión para distintas tensiones.

La figura 260 nos muestra uno de los cambios de tensión que es clásico en motores trifásicos. Se pasa de conexión estrella a triángulo para reducir la tensión con un factor 1,73 que es la relación que hay entre la tensión de línea y de fase en los sistemas trifásicos. Muchas veces ese cambio puede

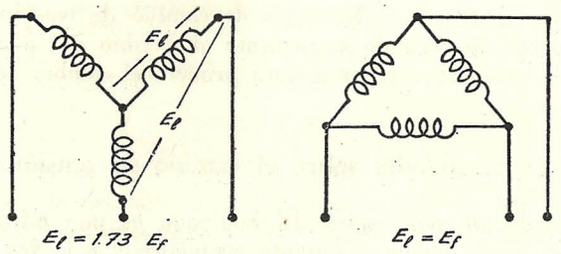

FIG. 260. — Un bobinado trifásico puede cambiar sus conexiones de estrella a triángulo y viceversa.

hacerse simplemente en la caja de bornes, cambiando los puentes, pero otras veces hay que hacerlo dentro de la máquina.

Con lo dicho se han sentado las normas más simples. Siempre es posible deshacer los puentes que hay entre las diferentes secciones del bobinado, las de cada fase, y hacerlos de otra manera para aplicar diferentes tensiones. Y si ese estudio se resume en un cuadro de posibilidades, más cómodo aún. Haciendo números, podemos aplicar un criterio práctico para hacer los cambios de tensión más comunes en la práctica. Llamemos E a la tensión normal a que funcionaba el motor, por fase y E_1 a la tensión a la que se quiere conectar. Entre ambas hay una relación que llamaremos K, y se puede escribir:

$$E_1 = K\ E$$

Y si damos en una tabla los valores de K para cada caso, el problema queda resuelto.

Valores de K

Situación anterior de las bobinas		Cambiando las bobinas a: estrella						triángulo					
		todos en serie	2 grupos paralelo	3 grupos paralelo	4 grupos paralelo	5 grupos paralelo	6 grupos paralelo	todos en serie	2 grupos paralelo	3 grupos paralelo	4 grupos paralelo	5 grupos paralelo	6 grupos paralelo
estrella	todos los grupos en serie	1,0	0,5	0,33	0,25	0,20	0,17	0,58	0,29	0,19	0,15	0,12	0,10
	2 grupos en paralelo	2,0	1,0	0,67	0,50	0,40	0,33	1,16	0,59	0,39	0,29	0,23	0,19
	3 grupos en paralelo	3,0	1,5	1,0	0,75	0,60	0,50	1,73	0,87	0,58	0,43	0,35	0,29
	4 grupos en paralelo	4,0	2,0	1,33	1,0	0,80	0,67	2,32	1,16	0,77	0,58	0,46	0,39
	5 grupos en paralelo	5,0	2,5	1,67	1,25	1,0	0,83	2,88	1,44	0,96	0,72	0,58	0,48
	6 grupos en paralelo	6,0	3,0	2,0	1,50	1,2	1,0	3,46	1,73	1,15	0,87	0,69	0,58
triángulo	todos los grupos en serie	1,73	0,86	0,58	0,43	0,35	0,29	1,0	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17
	2 grupos en paralelo	3,46	1,73	1,15	0,87	0,69	0,58	2,0	1,0	0,67	0,50	0,40	0,33
	3 grupos en paralelo	5,19	2,59	1,73	1,30	1,04	0,87	3,0	1,5	1,0	0,75	0,60	0,50
	4 grupos en paralelo	6,92	3,46	2,31	1,73	1,38	1,15	4,0	2,0	1,33	1,0	0,80	0,67
	5 grupos en paralelo	8,65	4,33	2,88	2,16	1,73	1,44	5,0	2,5	1,67	1,25	1,0	0,83
	6 grupos en paralelo	10,4	5,19	3,46	2,6	2,08	1,73	6,0	3,0	2,0	1,50	1,20	1,0

Veamos un ejemplo. Un motor tenía su bobinado en estrella y con 4 grupos en paralelo y se quiere conectar a una tensión doble, o sea que el factor $K = 2$. Entramos en la tabla por la posición anterior, línea cuarta y buscamos la cifra de $K = 2$, y leemos arriba que debemos conectar el bobinado en estrella, pero con sólo dos grupos en paralelo por fase, o sea que se tendrán dos series de dos grupos en paralelo en cada fase.

Cambio de la velocidad de giro

De acuerdo a lo que hemos visto en el capítulo VII, la velocidad de un motor asincrónico está ligada a la frecuencia y al número de polos por la expresión general:

$$n = \frac{120\ f}{p}$$

Es decir que para cambiar la velocidad de giro podemos alterar la frecuencia o el número de polos del bobinado. Como la frecuencia es un factor que no depende de nuestra voluntad, pues es una característica de la corriente de canalización, nos queda el variar el número de polos.

Cuando se tiene un motor ya bobinado, habrá que estudiar si es posible cambiar sus conexiones para que se produzca una cantidad de polos diferente, y si no fuera posible tal cosa habrá que rebobinar el motor, y estaríamos frente a un caso de bobinado de los tratados anteriormente. Nos interesan pues en forma especial todos los casos en que el simple cambio de conexiones de las secciones o grupo de bobinas de cada fase nos produzca un cambio en el número de polos.

Un caso concreto nos dará las normas a que se debe ajustar el estudio de la posibilidad de cambiar el número de polos en un bobinado. La figura 261 nos muestra cuatro formas distintas de conectar los grupos de bobinas para cambiar el número de polos o sea la velocidad de rotación en un motor trifásico de 54 ranuras. El bobinado original era de 6 polos y estaba dispuesto con tres bobinas en cada grupo. Al pasar a las conexiones para que funcione con 4 polos, se forman 12 grupos por fase, teniendo cada grupo 4 y 5 bobinas, pues son diferentes, de a pares. Para que funcione con 12 polos se forman 18 grupos de una sola bobina por grupo.

Los cambios señalados traen otros consigo. Por ejemplo, la potencia que rinde al motor es diferente para cada tipo de conexión, y la tensión a aplicar también. A título ilustrativo, damos la siguiente tabla:

Polos	Potencia C. V.	Tensión V.
4	110	485
6	100	440
8	85	380
12	50	220

Como vemos, es muy importante tener en cuenta lo que dice el cuadro, pues al querer usar el motor después de la modificación hay que variar las cifras consignadas por la fábrica. Puede hacerse necesario conectar el motor a través de un transformador reductor de tensión para aplicarle la que

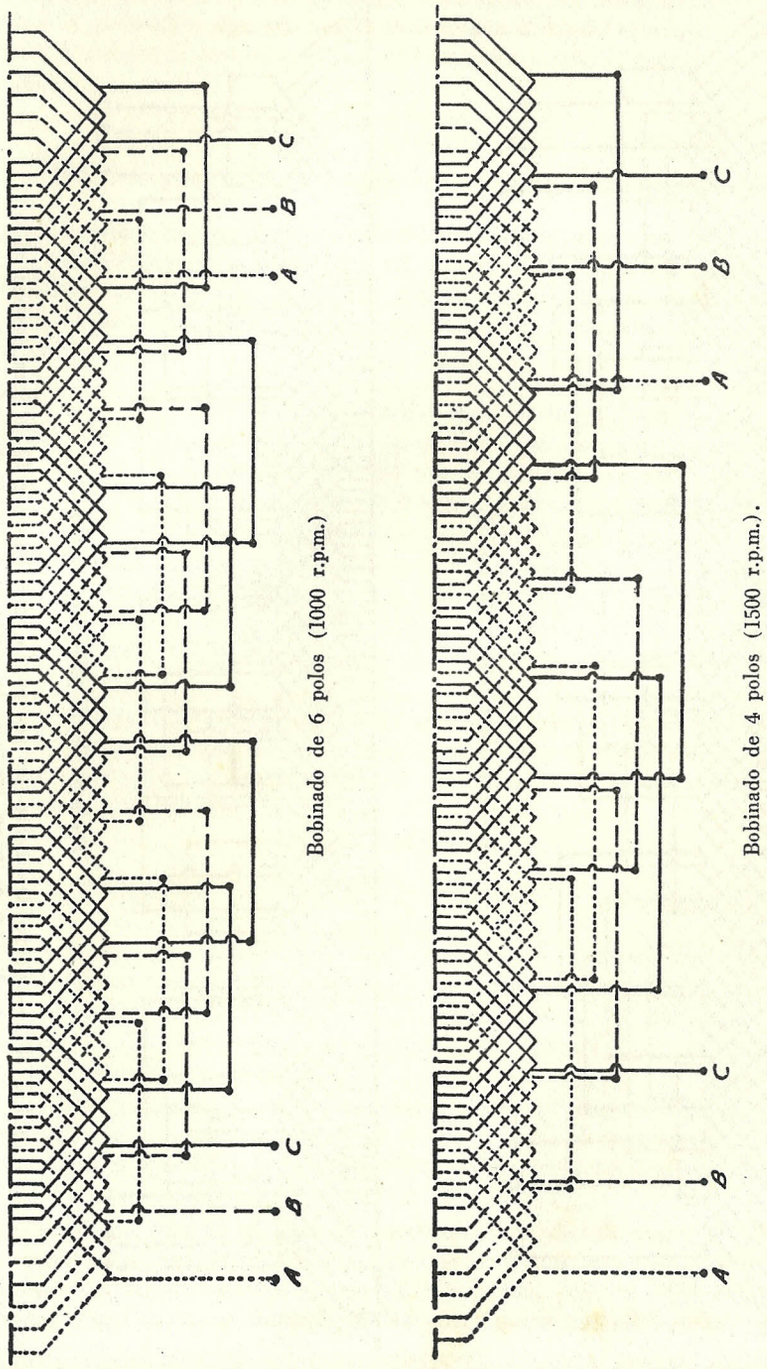

FIG. 261. — Forma de cambiar los puentes en un bobinado trifásico para cambiar el número de polos. En todos los casos es el mismo bobinado.

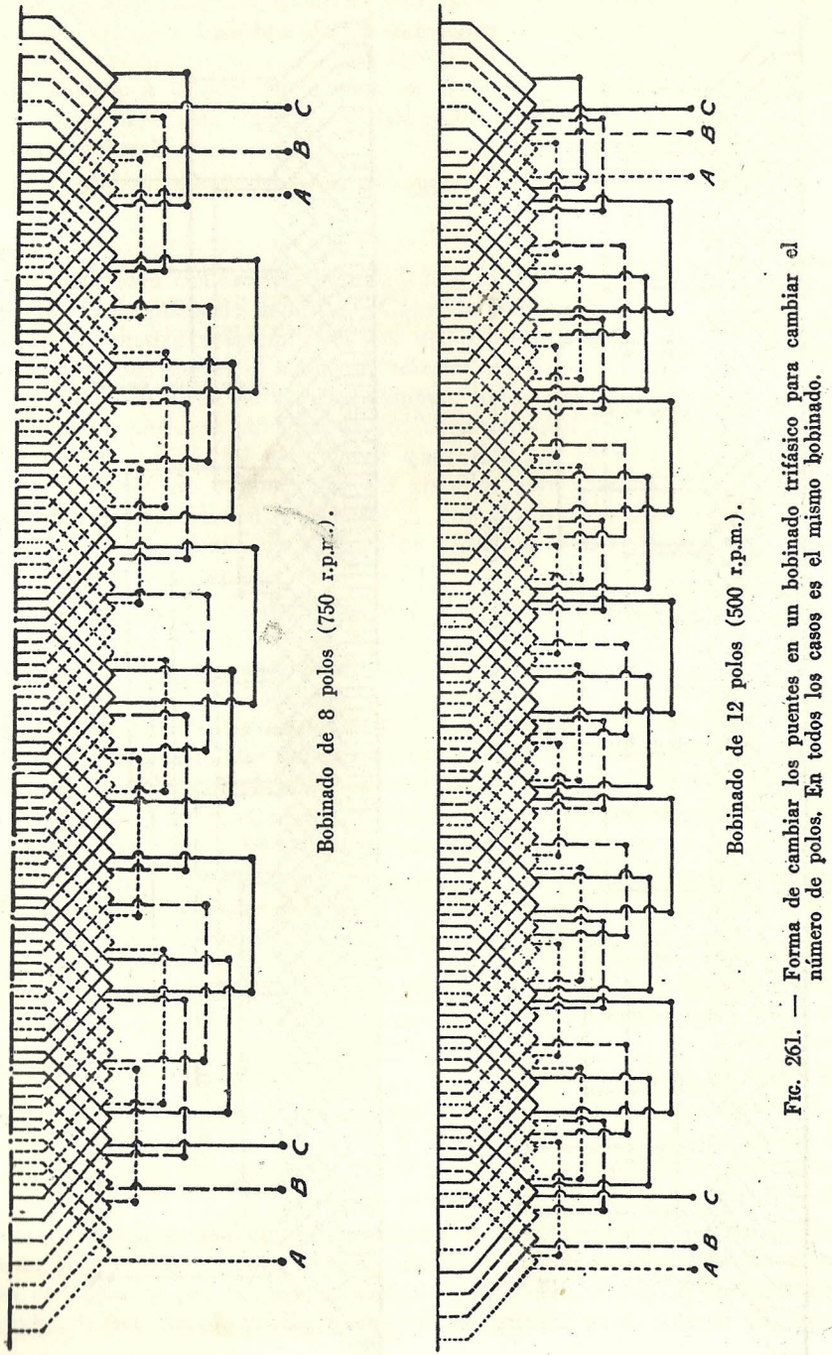

FIG. 261. — Forma de cambiar los puentes en un bobinado trifásico para cambiar el número de polos. En todos los casos es el mismo bobinado.

corresponda de acuerdo con la tabla, y en todos los casos hay que tener en cuenta la reducción operada en la potencia que rinde el motor, que, como vemos, es menor al aumentar el número de polos o sea, al reducir la velocidad de giro.

Normas generales que rigen los cambios de características

Los cambios de tensión y de velocidad vistos, y otros que pueden presentarse, inclusive cuando se rebobina un motor, están sujetos a ciertas normas que deben ser respetadas, o por lo menos, saber qué ocurre cuando no se las puede tener en cuenta. Esas normas pueden resumirse de la siguiente manera:

1) El paso del bobinado debe guardar una cierta relación con el número de polos. Esa relación no es otra cosa que el paso polar, igual al número total de ranuras dividido por el número de polos. Sabemos que el paso del bobinado es siempre un poco menor que el paso polar, pero hay que mantenerse dentro de los límites razonables.
2) Todo cambio de características se traduce prácticamente en un cambio de la tensión de régimen y hay que tenerlo en cuenta. La variación de la cantidad de espiras en serie en cada fase debe corresponder a la variación de la tensión aplicada para mantener la cantidad de Volt por espira.
3) Al aumentar la velocidad de un motor hay que verificar que la fuerza centrífuga no arranque al bobinado, en el caso que se trate de un rotor. Esto equivale a la verificación de aislación en el caso de aumentar la tensión de régimen.

TRANSFORMACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS EN MONOFÁSICOS

De acuerdo con lo que hemos visto en el capítulo VIII, de arranque de los motores asincrónicos, se ve claro que cualquier motor trifásico puede ser conectado como monofásico, para lo que se conectarán los bobinados correspondientes a dos fases como arrollamiento de trabajo y el de la tercera, como fase auxiliar de arranque.

Es evidente que esta modificación acarrea una disminución de la potencia del motor, que se reduce a sólo el 60 % de la normal en conexión trifásica, siempre que se aplique a cada sección del bobinado la tensión que le corresponde. Si esto no se cumple, la reducción es mayor.

El principio en que se basa la transformación de un motor trifásico en uno monofásico, es que dos de sus fases se conectan en serie o en paralelo, según la tensión de la red que haya disponible, pero esa conexión debe hacerse de modo que se mantengan las polaridades magnéticas del inductor

para mantener el número de polos del mismo, sí se debe conservar la velocidad.

Aclararemos lo dicho con un ejemplo práctico. Supongamos que se tiene un motor trifásico de 1.500 r.p.m., es decir, de cuatro polos, con 36 ranuras en el estator, con devanado tipo en cadena. (Ver figura 262.)

El bobinado completo está indicado en la figura, y es de cabezas en dos planos, como la mayoría de los de cuatro polos o más. Indicamos el comienzo

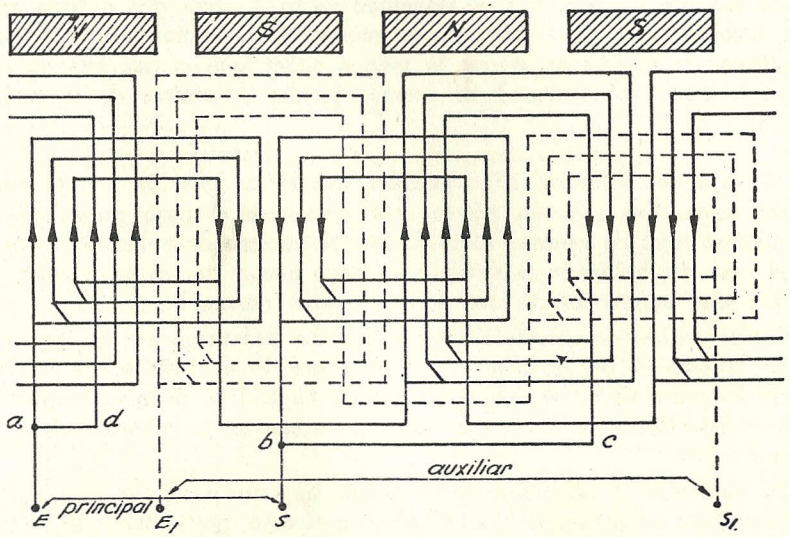

FIG. 262. — Transformación de un bobinado trifásico en monofásico.

de la fase 1 con la letra *a* y el fin de la misma con *c*; la fase 2 empieza en *b* y termina en *d*. La fase 3, la hemos dibujado punteada, pues la reservamos para devanado auxiliar de arranque, y comienza en E_1 y termina en S_1, tal como se puede ver en el trazado de la figura.

Como se trata de un devanado de cuatro polos, podemos colocar cuatro masas polares imaginarias, que ayudarán a encontrar los sentidos de las corrientes instantáneas en los lados de bobinas debajo de cada polo. Suponiendo, para un dado momento, que la corriente asciende debajo del polo Norte y desciende bajo el Sud, se han marcado las flechas que indican los sentidos de las corrientes en las dos fases 1 y 2, si se quiere tener un devanado monofásico.

Siguiendo tales sentidos se conectan las dos series de bobinas de la fase 1 y las de la fase 2 separadamente, pero para unir entre sí esas dos fases, se ve que la única forma de mantener la circulación cerrada respetando las polaridades magnéticas, es conectar *a* con *d* y *b* con *c*, en la forma que se muestra en la figura. De modo pues, que tendremos en E y S la entrada y salida del bobinado principal del motor.

El bobinado de arranque debe estar desplazado 90° del principal, lo que es fácil comprobar, pues la entrada E_1 de la fase auxiliar está distando la mitad del paso polar de la E_1 del principal, es decir, precisamente 90° eléctricos.

Esta es la manera de encarar las soluciones, vista directamente sobre el trazado de un bobinado. En lo que sigue representaremos al devanado de cada fase mediante un símbolo, pues suponemos conocido el principio de la transformación.

Conocidas las conexiones internas a realizar en el bobinado, pasaremos revista a algunas de las exteriores, según se utilicen resistores, bobinas o capacitores en la fase auxiliar.

Esquema de conexiones

Según hemos visto en los párrafos anteriores, la transformación de un motor trifásico en monofásico sólo requiere cambiar algunas conexiones en el devanado mismo del estator. Veamos las conexiones que deben hacerse en el circuito exterior. Por de pronto tendremos que la conexión a la red se hace en dos golpes, una para el arranque y otra para la marcha, pues si se trata de una construcción para funcionar como trifásico, no es probable que dispongamos de interruptor centrífugo en el rotor para eliminar automáticamente la fase de arranque.

Una de las formas de realizar las conexiones se ve en la figura 263. Un inversor tripolar tiene en la posición inferior la conexión de arranque, en la cual se intercala en serie con el motor una resistencia no inductiva, por un lado, y una bobina de reactancia por el otro.

El resistor R se construye bobinando el conductor, la mitad en un sentido y la otra mitad en el otro, volviendo para atrás, a fin de anular el campo magnético producido por la corriente al recorrer sus espiras; en muchos casos, cualquier resistor común se presta para el trabajo que debe hacer, de modo que se puede ensayar hasta encontrar el adecuado.

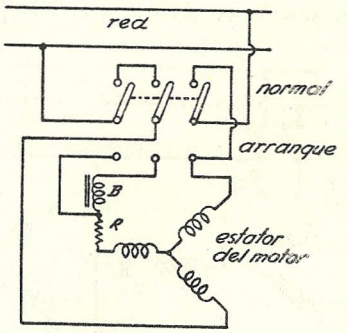

FIG. 263. — Conexiones de un motor trifásico estrella para funcionar como monofásico.

La bobina B está formada por una reactancia con núcleo de hierro, sobre el que se arrolla el conductor, tratando de darle sección generosa para que presente baja resistencia óhmica de circulación, a fin de acercarse lo más posible a las condiciones ideales. Cuando menos inductiva sea la resistencia R y menos resistiva sea la bobina B, mejores serán las condiciones de arranque para el motor.

Al conectar en serie las dos fases del bobinado, se debe tener en la red una tensión mayor que la que le debe tocar normalmente a cada fase del

motor. En caso contrario se reducirá la potencia del mismo considerablemente. Puede resultar preferible conectarlo en triángulo en vez de estrella, aunque esto no es muy frecuente.

La figura 264 ilustra el caso, donde se ve que los elementos que forman parte son los mismos, pero en la caja de bornes del motor se cambian los puentes o sino se arreglan en definitiva las conexiones para trabajar en esta forma.

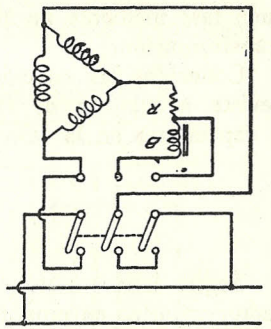

FIG. 264. — Conexiones de un motor trifásico triángulo para funcionar como monofásico.

Pueden también disponerse las conexiones para conmutar mediante un inversor, de modo que en funcionamiento normal trabajen dos secciones del devanado en paralelo y la tercera actúe sólo durante el arranque. En realidad las combinaciones son muy numerosas, y siempre el bobinador encontrará que una de ellas es más ventajosa que las otras, de la observación de los resultados.

Así, por ejemplo, también se puede lograr el arranque empleando capacitores, tal como se vió en el capítulo VIII. Este capacitor se debe conectar a la fase auxiliar y debe ser desconectado en cuanto se alcanza el 75 % más o menos de la velocidad normal del motor. Sin embargo suele dejarse en circuito por su efecto sobre el factor de potencia, pues lo mejora, al absorber corriente adelantada de la red.

En la figura 265 se ven dos de las numerosas soluciones que se encaran para la conexión del capacitor de arranque. Así en (a), se utiliza la conexión en estrella, de dos de las fases, como se vió anteriormente, y el capacitor se inserta en serie con la fase auxiliar. Cuando se llega a la velocidad normal se desconecta el circuito de arranque mediante un simple interruptor intercalado en serie. Las conexiones a seguirse dentro del bobinado son las de la figura 262.

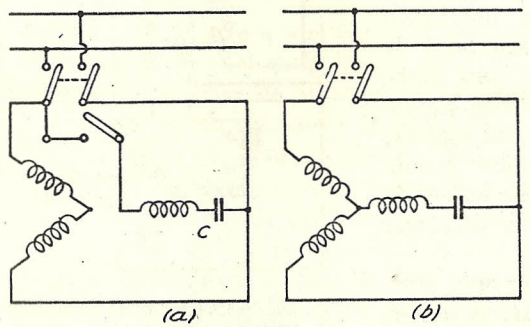

FIG. 265. — Conexiones para arranque con capacitor en el sistema estrella.

En (b) de la misma figura se ha optado por un sistema parecido, pero conectando en estrella normal el bobinado y poniendo en serie con la sección auxiliar del devanado al capacitor. Este montaje se utiliza para los casos en que se desea que el capacitor quede en circuito aun en funcionamiento normal, es decir, después del arranque. Los dos esquemas utilizan sistema estrella de conexión para el devanado trifásico, suponiendo que la tensión de la red permite utilizarlo.

Si el bobinado debe conectarse en triángulo, la figura 266 da dos de los muchos esquemas posibles. En (a), el capacitor se ha intercalado entre los extremos de dos fases del bobinado, con lo que se reduce la impedancia de la rama en que queda conectado, además de provocar un defasaje entre las corrientes de las dos ramas que se conectan a la red. Después del arranque puede quedar conectado todo el bobinado.

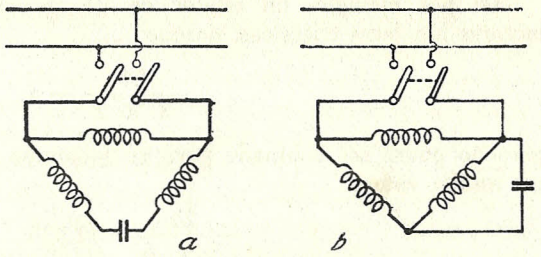

FIG. 266. — Conexiones para arranque con capacitor en el sistema triángulo.

En (b), el capacitor se deriva de una de las fases solamente, con lo que resulta el defasaje necesario para el arranque. La tensión aplicada al bobinado de una sección es la de la red, totalmente, de modo que estos dos esquemas se utilizan cuando el motor debe conectarse a una tensión que es igual a la original cuando el motor trabaja como trifásico.

No son las propuestas las únicas soluciones a emplearse en la transformación, pues de la observación de los esquemas de arranque dados en el capítulo VIII se pueden deducir otros, que no tratamos por no salir más del tema de esta publicación dedicada a los devanados.

TRANSFORMACIÓN DE MOTORES MONOFÁSICOS EN TRIFÁSICOS

Este problema es un poco más complejo que el inverso, tratado en los párrafos anteriores, y lleva casi siempre a un rebobinaje del motor, si ello es posible. En efecto, es difícil que el bobinado de un motor monofásico sea de tal confección que la fase auxiliar sea idéntica a las dos mitades de la fase principal, caso único que permite pasar a conexión trifásica con sólo hacer algunos cambios en los puentes de conexión del bobinado.

Si no tiene un devanado como el mencionado se debe rebobinar el estator, pero atendiendo a ciertas condiciones que rigen para los trifásicos y que no están presentes en los monofásicos.

Por de pronto, para que se pueda realizar un devanado trifásico a ocupación total de ranuras, que es lo ideal, la cantidad de ranuras debe estar en cierta relación con el número de fases y con la velocidad de giro del rotor. Si la velocidad es conocida, resulta un número de polos dado por:

$$p = \frac{120\ f}{n}$$

en la que f es la frecuencia (comúnmente igual a 50 períodos por segundo) y n la cantidad de r.p.m. del rotor.

La condición a cumplir es que el cociente entre la cantidad de ranuras N

del estator y el producto del número de fases y de polos dé un número entero:

$$\frac{N}{3\ p} = \text{número entero}$$

Así por ejemplo, un estator de 24 ranuras podrá ser bobinado para motores bipolares trifásicos, porque

$$\frac{24}{3 \times 2} = 4$$

pero no podrá ser bobinado para un motor de seis polos, porque el cociente no resulta entero:

$$\frac{24}{3 \times 6} = 1{,}333\ldots$$

y así sucesivamente, se comprueba rápidamente la posibilidad de realización de un devanado trifásico a ocupación total de ranuras, que, como se dijo más arriba, se debe tratar siempre de obtener. En caso contrario se podrá trazar un bobinado a ocupación parcial de ranuras, dejando tantas vacías como sean necesarias para cumplir la condición anterior. Así en el caso del estator de 24 ranuras, si se dejan 6 vacías, quedan 18, que es divisible por el producto (3 p) y podrá ejecutarse un bobinado con una ranura por polo y fase, es decir, del tipo concentrado (ver capítulo XXI). También es posible a veces realizar un bobinado fraccionario a ocupación total de ranuras.

Muchas veces, para convertir un motor monofásico en trifásico, basta sacar la fase auxiliar y colocar en su lugar una principal, idéntica a las dos mitades del devanado principal del motor. Esto se puede efectuar, cuando el número de ranuras que estaba ocupado por el devanado auxiliar era igual a la mitad de las que ocupaba el principal, que es el caso teórico ideal.

Al transformar de esta manera al motor, se consigue un aumento de la potencia, pues en el motor monofásico la parte que corresponde al sistema de arranque no proporciona potencia útil alguna. mientras que después de la transformación sí, por tratarse de una nueva fase que funcionará en igual forma que las otras dos, formadas por las dos mitades del bobinado principal del motor monofásico.

CAPÍTULO XXVII

EJECUCIÓN Y REPARACIÓN DE BOBINADOS

Con lo visto hasta aquí está el lector en condiciones de encarar el proyecto de cualquier bobinado o rebobinaje para motores o generadores de cualquier clase de corriente. Pero faltan considerar algunos detalles prácticos que resultarán conocidos para los más expertos pero son necesarios para completar el tema. Esos detalles se refieren a la ejecución y a la reparación de los bobinados, y haremos una síntesis para que sirva de orientación.

Desde el punto de vista de la ejecución, los bobinados pueden clasificarse en: *a mano y moldeados,* no interesando ni el destino ni otros detalles que hacen a la máquina. Los primeros se devanan directamente en las ranuras y los segundos afuera de ellas, colocándolos bobina a bobina una vez terminadas. En ambos casos las conexiones entre bobinas, al colector, los puentes y demás conexiones se hacen una vez que están en sus respectivas ranuras todas las bobinas.

Ejecución de bobinados a mano

Estos bobinados se hacen pasando directamente los conductores dentro de las ranuras, tantas veces como espiras tenga cada bobina, para formar un paquete encintado una vez completada ésta. Claro que el encintado abarca solamente las cabezas de bobinas y que muchas veces es solamente una envoltura en forma de abrazadera, que se hace a espaciados regulares. Para ilustrar sobre esto está la figura 267.

Dentro de las ranuras se ha colocado previamente una lámina de cartón aislante que la forra totalmente y que sobresale en ambas cabezas para evitar que los conductores tomen contacto con las aristas finales del paquete de chapas y se pele la aislación. Una vez pasados todos los hilos de una ranura los bordes del cartón se doblan hacia adentro en la forma como lo muestra la figura 268. Estos cartones aislantes toman distintas denominaciones comer-

ciales, y su espesor está ligado a la tensión máxima presente en el bobinado y a las dimensiones de la ranura. Generalmente existen tablas que dan los espesores necesarios de cada tipo según la tensión. En general, se usan espesores de un milímetro para tensiones de hasta 500 Volt; 1,2 mm para 1.000 Volt y para tensiones mayores se prefiere usar materiales mejores como la micanita o la mica, con espesores de 0,5 mm por cada 1.000 Volt. más o menos.

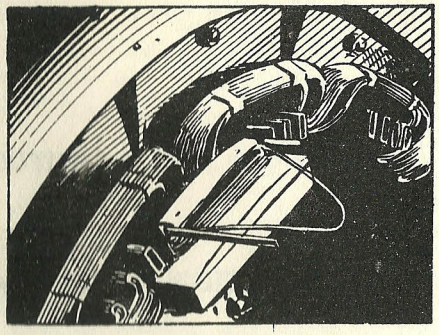

Fig. 267. — Colocación de conductores en las ranuras y encintado de las bobinas.

En la ejecución de los bobinados grandes, muchas veces se colocan moldes de madera para formar las cabezas de bobinas, cosa que se ve en la figura 267. Esos moldes se retiran al terminar cada bobina. Para bobinados chicos o comunes no se pierde tiempo en ese detalle y se arrolla directamente el conductor formando el paso necesario, y luego se encintan las cabezas de bobinas con la mayor prolijidad posible. Todo el encintado se somete, igual que el bobinado que usa forro de algodón, a un baño de barniz especial y secado en el horno.

Mientras se ejecuta el bobinado, se van apretando los conductores contra el fondo de la ranura por presión o golpeando con un martillo sobre una cuña de madera que se introduce en la ranura. Esto es necesario para que tengan cabida todas las espiras que deben entrar en la ranura. Este procedimiento no es posible cuando en lugar de una lámina de cartón como la de la figura 268, dentro de la ranura va un tubo cerrado, en el cual debe enhebrarse el conductor para formar cada espira. En ese caso, si se quiere trabajar con prolijidad, se colocan primero dentro del tubo alambres de acero un poco más largos que la ranura y se los va sacando de a uno para dar paso a cada espira que se coloca. Se asegura así, la cabida de la cantidad de alambres para formar la bobina.

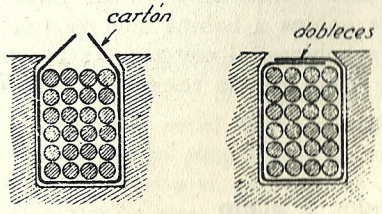

Fig. 268. — Los conductores quedan separados del hierro por una lámina de cartón, que luego se pliega.

Ejecución de bobinados moldeados

En máquinas pequeñas donde se quiere ahorrar tiempo en la ejecución del bobinado, y en las grandes en las que se desea presentar un trabajo más prolijo y seguro, se emplean las bobinas moldeadas. Para ello se usan moldes o formas de madera, cuyo aspecto es el de un carretel chato. El alma

es rectangular con sus lados menores redondeados. El ancho del alma coincide con el paso de la bobina y el largo es un poco mayor que el de la ranura. Hecha la bobina se la retira del carretel y se la coloca en la ranura, que ya tiene su lámina de cartón, pasando los hilos de a uno y prensando luego. Finalmente se hace el encintado o las ataduras con cinta de algodón, y se impregna todo con barniz y se seca al horno.

En el caso de bobinados con tubos aislantes en lugar de láminas de cartón, esos tubos se deben colocar al hacer la bobina, la que se hará por enhebrado, y luego se colocan en las ranuras la bobina con sus tubos, los que deben ser de tipo más flexible.

Hay algunos tipos de bobinados que se hacen en molde, luego se hace un corte en una de las cabezas, se coloca en las ranuras y se sueldan uno a uno todos los conductores en el corte. Claro que esto se justifica sólo en casos especiales, donde la producción en serie es más importante que cualquier otra cosa. También ocurre ese caso en máquinas con ranuras cerradas en las que no pueden colocarse las bobinas terminadas si no se las corta. Es preferible el hacer ranuras abiertas, las que pueden cerrarse a posteriori con láminas de hierro en la forma como se ve en la figura 269. Esto en el caso de los estatores sirve únicamente para mejorar el circuito magnético, pero en el caso de los rotores de alta velocidad, le da mayor rigidez al bobinado y eventualmente impide su salida de las ranuras.

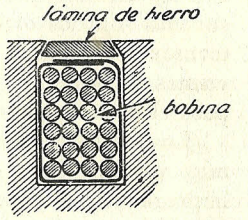

Fig. 269. — Uso de láminas de hierro para cerrar las ranuras mejorando el circuito magnético y la rigidez del bobinado.

Ejecución de bobinados de barras

En este caso no se puede hablar de hacer bobinas, puesto que cada una tiene una sola espira. Pueden ser hechas directamente en la ranura pero más frecuentemente, como hay que doblarlas en caliente cuando tienen una sección considerable, se las hace en moldes, y luego se las coloca en la ranura. Si el ancho de la abertura de estas últimas no permite el paso de la barra, se hacen las espiras sin cabezas, las cuales se preparan aparte, y luego se las atornilla y suelda a las partes activas que están dentro de las ranuras y sobresalen por los extremos de ellas.

Las barras se envuelven con cinta antes de colocarlas en las ranuras, o dentro de éstas va el cartón aislante y sólo se encintan las cabezas de las espiras. Es muy común que las barras tengan sección transversal rectangular y no redonda, para aprovechar bien la cavidad de la ranura. Recordemos que los bobinados en barras pueden ser a simple capa, en los que va una barra en cada ranura, y a doble capa, en cuyo caso van dos barras por ranura, aisladas entre sí.

Aislación de los bobinados

Hay que distinguir, en este aspecto, los bobinados de estator de los de rotor. Los de estator no presentan el problema de fijar los conductores dentro de las ranuras porque se quedan solos, con el simple expediente de doblar el cartón, según se ilustró en la figura 268. Para los de rotor puede no ser suficiente ese procedimiento, de manera que se cierran las ranuras con láminas en forma de cuña de hierro o de madera (figura 269). También se pueden colocar sunchos que abracen el rotor y, por consiguiente, a su bobinado. Esos sunchos son dos o tres, repartidos a lo largo del rotor, para lo cual se deben tornear escotaduras, y se los hace con una lámina de acero o con varias vueltas de alambre. La unión debe quedar embutida sin sobresalir del rotor, pues el entrehierro es muy pequeño y rozaría fácilmente con el estator.

Los cartones empleados para envolver las bobinas tienen composición muy variada, pues se hacen desde el tipo de papel prensado hasta la tela impregnada en capas. Los espesores son desde 0,4 mm para tensiones de 250 Volt o menos, hasta varios milímetros para altas tensiones. Entre espiras de una misma bobina no se coloca otra aislación que la envoltura del mismo alambre, pero entre bobinas de una misma ranura puede colocarse cartón del mismo tipo que aisla la bobina del hierro.

Para bobinados de alta tensión y para los que deben trabajar en lugares húmedos o ambientes corrosivos, no debe quedar aire dentro de las ranuras, por lo que se emplean los tubos aislantes como envoltura, que luego se llenan con barniz, laca o productos similares. Las cabezas de bobinas, fuera de las ranuras se tratan con encintado y embebido, de manera que no quedan al contacto del aire. El secado en horno debe hacerse con precaución para evitar el escurrido de los barnices. Se emplean bajas temperaturas y tiempo prolongado, como medida de seguridad, las que deben extremarse en los casos antes señalados.

En el caso de máquinas que trabajaran en lugares secos, y las tensiones no sean elevadas, pueden dejarse sin envoltura las cabezas de bobinas, lo que facilita la ventilación. Pero siempre se barnizan para darle el mínimo de protección contra la corrosión y una aislación que cubra el mínimo de los requerimientos de cada caso.

Los barnices empleados se denominan "aislantes" y hay de dos tipos: los claros y los oscuros. Cada uno tiene variedades según el uso, para secado al aire, a estufa o al alcohol. Las denominaciones dependen del país de origen, y por ejemplo, en Buenos Aires encontramos los tipos: "Esquidus" de fabricación local y "Standard" y "Voltalac" de importación. Se pueden aplicar por inmersión, a pincel o a soplete, pero debe respetarse en cada caso el tipo de secado indicado por la fábrica.

Evidentemente no se ha dicho la última palabra en materia de aislaciones, pues la industria del plástico está en condiciones de ofrecer al mercado materiales nuevos, sobre cuyas características no puede abrirse juicio definitivo, el cual queda librado a los anuncios que se hagan al respecto.

Conexiones equipotenciales

Las razones dadas en el capítulo XV para explicar la necesidad de las conexiones equipotenciales o de compensación en las máquinas de corriente continua son válidas, en cierto modo, para las máquinas de corriente alternada. Los desequilibrios magnéticos por irregularidades del entrehierro y las diferencias físicas entre bobinas de distintos polos se presentan también en estas máquinas, y muchas veces se acude a unir con puentes los puntos del bobinado que deben estar teóricamente al mismo potencial. La diferencia sustancial está en que en este caso no se busca una reducción del chisporroteo bajo las escobillas, que no existen en una gran parte de los motores de alterna, sino en un mayor equilibrio electromagnético para mejorar el funcionamiento del motor.

Si analizamos los esquemas de los bobinados de alterna encontraremos en ellos que muchas veces se forman secciones en serie y que los grupos de ellas van en paralelo, tal como se muestra en la parte de la izquierda de la figura 270. Los puntos A y B deben estar teóricamente al mismo potencial, pero no ocurre así. Haciendo un puente entre esos dos puntos por el mismo circulará corriente y se compensa la diferencia de potencial entre los dos puntos, equilibrando las corrientes en las dos ramas.

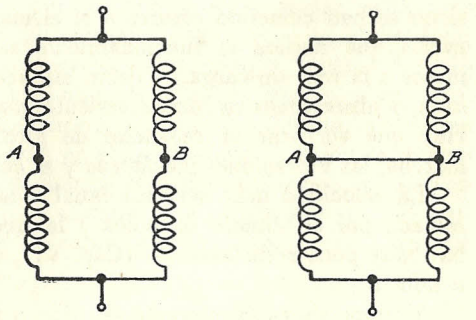

FIG. 270. — El puente *AB* constituye una conexión equipotencial entre ramas en paralelo de grupos en serie en un bobinado.

Hay que hacer una salvedad, y es que la posibilidad de ejecutar las conexiones equipotenciales en los bobinados de alterna está supeditada a la existencia de grupos en paralelo, pues no pueden hacerse, por ejemplo, entre fases distintas en los bobinados trifásicos, ni entre grupos de diferente polaridad. Hay que analizar siempre si en cada instante, los puntos que se piensan unir, están al mismo potencial instantáneo. En máquinas multipolares con varias ramas en paralelo es posible hasta hacer anillos equipotenciales, o sea conexiones que dan toda la vuelta en las cabezas del bobinado, y van conectando al pasar los puntos de igual potencial de cada fase. Normalmente, puede decirse que el número de conexiones equipotenciales no puede exceder a la cantidad de ramas en paralelo.

FALLAS COMUNES EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Si bien muchas anomalías que presentan las máquinas eléctricas no pueden achacarse al bobinado, haremos mención de las más comunes para referirnos en forma general a los problemas de la reparación. Una primera clasificación

separaría las fallas en las de origen o tipo mecánico y las del tipo eléctrico. Las mecánicas son, a su vez, de varias clases, pues hay vibraciones, ruidos, rozamientos, calentamiento de cojinetes, etc. Muchas veces no es fácil determinar de inmediato si una vibración, por ejemplo, tiene su origen en una cuestión mecánica o magnética, pues esta última también puede producir vibraciones. Por tal motivo es preferible agrupar las fallas por la forma como se presentan y no por su origen, el cual precisamente es el que debe ser investigado.

Vibraciones y zumbidos

Ejecutado un bobinado, y armada nuevamente la máquina, debe probarse si no se han cometido errores o si el material utilizado no ha sufrido alguna avería que impida el funcionamiento normal de aquella. Si conectamos el motor a la red, sin carga, es decir, sin acoplar la máquina que debe ser impulsada, y observamos su funcionamiento, pueden fácilmente aparecer los defectos. Hay que verificar la velocidad de giro, los zumbidos característicos de la marcha, las vibraciones mecánicas y el calentamiento parcial o total del motor.

La velocidad debe ser casi igual a la sincrónica, que sabemos está determinada por el número de polos y la frecuencia (120 f/p), y como en vacío hay muy poco resbalamiento (Cap. VI), se debe tener una cifra muy próxima a aquélla.

Veamos ahora lo referente al ruido o zumbido de marcha, al que están ligadas muchas veces las vibraciones. Al girar el rotor se produce un zumbido debido al aire que impulsan las aletas de ventilación contra las ranuras del estator y al desplazado por las partes salientes en giro. Otro zumbido se debe a causas magnéticas, pues al haber un paquete de chapas sometidas a un campo magnético alternado, se produce una vibración por no estar solidariamente unidas. Para distinguir uno de otro se hace arrancar el motor en vacío y cuando está girando se abre la llave, con lo que desaparece el fenómeno magnético y queda solamente el zumbido mecánico. Claro que al reducirse la velocidad se pierde también el ruido, pero abriendo y cerrando el interruptor lo mantenemos y podemos comparar con comodidad los dos tipos de zumbido, el mecánico solo y la mezcla de los dos.

Si el zumbido mecánico es normal, cosa que dicta la experiencia por comparación con motores similares, hay que verificar si la vibración producida por los fenómenos magnéticos no es excesiva. Mientras el motor gira se toca la carcasa, y vuelve a hacerse la prueba de abrir y cerrar el interruptor. Una vibración excesiva a llave abierta es indicio de que hay una falla mecánica, que puede ser: defectos de cojinetes, excentricidad del rotor dentro del estator, falta de compensación dinámica del rotor o eje torcido.

Cualquiera de esos problemas puede ser verificado en el banco de pruebas, y tiene remedio con una rectificación o con una compensación dinámica, cosa que escapa al tema de esta publicación.

Si la vibración sólo se produce al cerrar la llave, mientras manteníamos la marcha, la falla pertenece al sistema electromagnético, aunque a veces también

tiene su origen en irregularidades mecánicas. En efecto, una excentricidad en el entrehierro produce una desuniformidad en las fuerzas de giro que se traduce en vibraciones mecánicas que aparecen al actuar el campo magnético y no sin él. La ovalización del rotor o del estator también puede ocasionar vibraciones cuando aparece el campo magnético, y el origen de las mismas debe buscarse en imperfección del matrizado de las chapas. Claro que la mayoría de los motores existentes adolecen de esta falla en mayor o menor grado, y hay que determinar hasta qué punto la vibración puede ser molesta y nos lleva a una rectificación, la que, casi siempre, ocasiona un aumento del entrehierro, lo que trae otra clase de inconvenientes. Por eso debe estudiarse previamente el problema y pesar el pro y el contra de la rectificación.

Otras vibraciones electromecánicas pueden originarse en malas soldaduras de las barras del rotor a los aros de cortocircuito extremos, pues al producir diferencias en las corrientes que las recorren dan origen a fuerzas de giro irregulares. Claro que si se trata de un bobinado y no de barras, y hay contactos a masa o cortos parciales, también se produce ese defecto, y aún en mayor grado. Y todavía si las fallas están en el bobinado del estator, la irregularidad en el campo giratorio produce fuerzas irregulares de giro, y también aparecen vibraciones. En otras palabras, cuando no hay vibraciones, el bobinado no presenta fallas de aislación y el motor funciona bien, puede afirmarse que está bien realizado el bobinado.

Revisión del bobinado

Lo primero que debe hacerse para determinar si no hay fallas groseras en el bobinado es verificar la temperatura de sus secciones. Esto puede hacerse después de haber marchado unos 5 minutos, y se verifica de inmediato si el calentamiento no es excesivo y si es uniforme en la periferia del estator y del rotor. Cualquier zona de mayor temperatura debe considerarse sospechosa, y se debe proceder a una revisión del bobinado, la aislación entre bobinas y entre éstas y masa, y muy especialmente los puentes de conexiones frontales, pues un error en ellos trae una distribución mala de las corrientes y fácilmente sobrecargas de una o algunas secciones.

Sólo después de hacer la verificación de zumbidos, vibraciones y calentamiento, y comprobado que son normales, puede seguirse revisando el bobinado. Se procede a medir las corrientes de cada fase, de acuerdo con los datos de chapa, y deben tenerse cifras coincidentes. Si es monofásico, la de chapa, y si es trifásico, tres corrientes iguales a la cifra de chapa. En vacío, la corriente del motor a velocidad plena debe tener un valor de alrededor de 20 a 25 % de la máxima carga. Cualquier anormalidad en la igualdad de cifras o en que se aparten de esas reglas indica que hay que revisar el bobinado.

Si se dispone de un wattímetro, puede medirse la potencia absorbida en vacío, girando a plena velocidad. En ningún caso esa potencia debe superar un 10 % de la máxima del motor. Recordemos que para medir la potencia trifásica se emplean dos wattímetros monofásicos conectados como se indica

en la figura 271, sumando las lecturas de ambos. Para deducir la potencia total del motor, en Watt, se multiplica la cifra de C.V. por 736.

Cuando las lecturas de corrientes o de potencia no se ajustan a las especificaciones mencionadas es porque hay una falla en el bobinado, la que puede ser de muchos tipos. Para orientar al lector daremos una nómina de las más comunes, que si bien no es completa, por lo menos abarca la mayoría de los casos prácticos.

Fallas comunes de los bobinados

Un bobinado está formado por una cantidad determinada de bobinas iguales, o diferentes, formando secciones, las que a su vez se agrupan en fases, y éstas se conectan entre sí en la caja de bornes. Cualquier conexión equivocada en una o más de las bobinas, secciones o fases, trae aparejado el funcionamiento defectuoso del motor. Las equivocaciones en las conexiones forman un grupo de fallas, y las otras se deben a defectos de aislación, sea en el bobinado o entre éste y masa, y los circuitos abiertos, por cortes, soldaduras malas u otra razón. Resulta interesante agrupar las fallas en la siguiente forma:

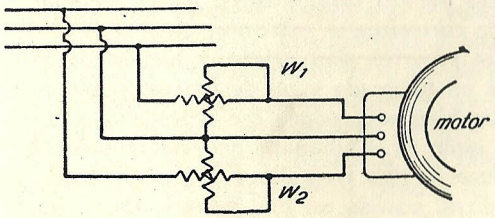

Fig. 271. — Con dos wattímetros se mide la potencia absorbida en vacío por el motor en prueba.

fallas de aislación	contacto a masa del bobinado
	cortocircuito entre espiras o bobinas
	interrupción de algún circuito
errores en las conexiones	corriente invertida en una bobina
	inversión de un grupo o serie
	diferente número de bobinas por polo
	inversión de una fase completa
	equivocada la tensión a aplicar
	error en el número de polos

Enumeradas en forma de cuadro nueve tipos de fallas, veamos cómo se encuentran y remedian. Seguiremos el orden enumerado para facilitar la explicación.

Contactos a masa

Cuando la aislación del alambre se ha dañado, puede ocurrir que el cartón o material de envoltura soporte el defecto sin que la falla se acuse en el motor, pero otras veces aparece una fuga a masa que debe ser localizada. Si hay un

punto de contacto entre el bobinado y la masa metálica del motor, la carcasa de éste está a un cierto potencial contra tierra que representa un peligro para el usuario. Por este motivo se exige siempre la conexión a tierra de la carcasa; si el cable que hace esa conexión conduce corriente, es porque hay una falla a masa. Otras veces se producen contactos a masa en dos puntos diferentes del bobinado, lo que equivale a formar un cortocircuito entre esos dos puntos; habrá entonces calentamiento excesivo de una sección del bobinado, no por cortocircuito entre el bobinado sino por doble masa.

La forma de localizar una falla a masa se explica en la figura 272. Tocando cada uno de los terminales de las fases del bobinado con un polo de la línea en el que se ha insertado una lámpara incandescente, y uniendo el otro polo a la masa metálica, la lámpara no debe encender. Claro que el megóhmetro sirve también, y posiblemente en forma más perfecta para el mismo fin.

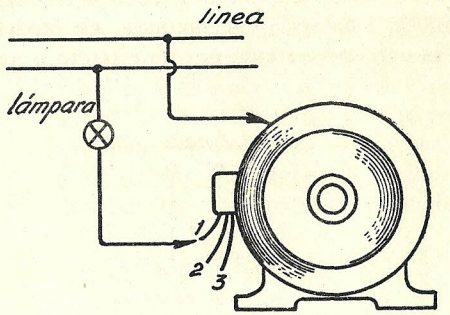

Fig. 272. — Forma de determinar si existe contacto a masa en el bobinado.

Determinado que existe una masa, hay que localizarla. Primero se hará una inspección ocular para encontrar la falla si es visible en las partes exteriores del bobinado. Si está dentro de una ranura ya el problema no será tan simple. Puede aplicarse entre el bobinado y masa una tensión mucho mayor que la de régimen y observar dónde se produzca un arco, chispa o humo, que indicaría el lugar de la falla. Generalmente bastan tensiones que son de 3 a 4 veces la normal. Si tampoco eso da resultado, hay que abrir los puentes de todas las secciones del bobinado y hacer con cada punta la prueba de la figura 272. Encontrada la sección que tiene la falla, será más fácil después localizar ésta, o si no hay otro remedio, levantar toda la sección.

Cortocircuitos en el bobinado

Cuando alguna bobina o varias presentan fallas de aislación que hacen tocarse espiras entre sí, se produce un funcionamiento irregular en el motor, y calentamiento excesivo de la sección afectada. Cuando se observa ese defecto, se puede localizar muchas veces la bobina defectuosa parando el motor y tocando el bobinado en toda su extensión para encontrar la parte más caliente. Claro que esto no siempre da resultado, pues hay casos de cortos que no producen mucha elevación de temperatura.

Un procedimiento más científico se indica en la figura 273, y consiste en un pequeño transformador con un solo bobinado, por ejemplo previsto para los 220 Volt de la línea. El núcleo es incompleto, pues le falta la culata o sea

una de las ramas de cierre. En serie con ese primario se conecta un amperímetro que indica la intensidad de magnetización del transformador. Al hacerlo deslizar por la periferia del estator o del rotor defectuoso, el hierro del mismo cierra el circuito magnético, y cualquier espira en corto actúa como un secundario en cortocircuito, produciendo una elevación de la intensidad leída en el instrumento. Localizado el corto hay que cambiar la bobina.

Interrupción de circuitos en el bobinado

El caso de un corte o interrupción de la continuidad de un alambre o de un puente o una conexión desoldada se localiza por los métodos que todo electricista conoce. Una serie con lámpara, un óhmetro o cualquier otra forma de avisar si la corriente circula por un circuito o no. Claro que si hay ramas en paralelo habrá que abrir los puentes entre ellas previamente. No insistimos en esto porque es elemental. Una fase interrumpida impide generalmente que el motor arranque con carga, pero puede permitirle arrancar en vacío. Un trifásico con una fase interrumpida arranca como monofásico, y lógicamente su potencia se reduce en forma considerable. Si el bobinado está conectado en triángulo debemos advertir que una fase cortada no se encontrará si antes no se abren los puentes de fases en la caja de bornes. Todo esto lógicamente será un problema si la simple inspección ocular no permite encontrar de inmediato la falla aludida, cosa frecuente si se trata de una soldadura defectuosa.

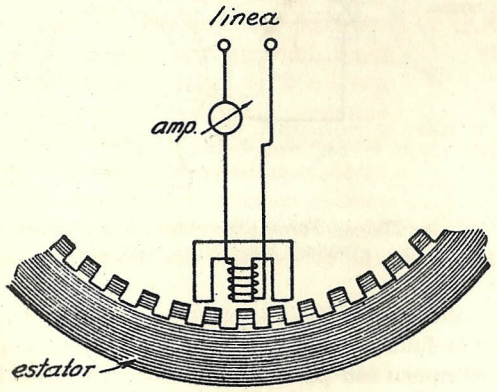

FIG. 273. — Un transformador sin culata permite localizar los cortocircuitos en el bobinado.

Inversión de bobinas o grupos

Cuando una bobina o un grupo de bobinas de una rama o de una fase están invertidas en su conexión al resto de la serie, como es el caso ilustrado en la figura 274, se produce una falla seria en el motor. En general, ocurre que se forma, por ejemplo, un polo sur dentro de un polo norte, o viceversa, y ello trae calentamiento, ruido y pérdida de potencia.

En el ensayo del motor el defecto se descubre si se trata de un grupo entero,

por diferencia de las corrientes de las fases, pero si es una sola bobina y el devanado tiene muchas, puede pasar desapercibido. Para localizarlo, se quita el rotor y se hace correr una brújula por la periferia del estator que está conectado, si es posible con una tensión reducida para evitar la fuerte corriente circulante. Cuando la brújula cambia la desviación de su aguja dentro del grupo correspondiente a un polo, es porque hay una bobina invertida. Claro que para ello hay que marcar en el estator los polos de cada fase, lo que se hace generalmente con tiza, observando el bobinado.

Diferente cantidad de bobinas por polo

El bobinado se divide primero en sus fases, si es trifásico. Luego se divide en grupos iguales, dentro de cada fase, para formar los polos. Cada grupo polar debe tener la misma cantidad de bobinas. Si un polo tiene diferente cantidad de bobinas que los otros, se produce un funcionamiento irregular acusado por vibraciones, zumbidos o desequilibrios mecánicos. Para localizar esa falla pueden contarse las cabezas de bobinas de cada polo y verificar si sus cantidades son iguales. Para remediarlo se cambian las conexiones del grupo defectuoso.

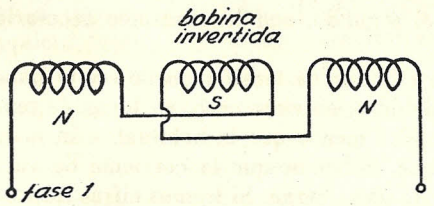

FIG. 274. — La inversión en una bobina produce una reducción del campo de una fase.

Inversión de una fase completa

Si al hacer las conexiones de las tres fases a la caja de bornes del motor equivocamos una de las fases, invirtiendo la entrada con la salida se produce el diagrama vectorial de la derecha de la figura 275 en lugar del normal de la izquierda. Los defasajes eléctricos no serán ya de 120° entre fases sino de 60°. La consecuencia es que en lugar de un campo giratorio normal se producen dos sentidos contrarios, uno menor y otro mayor, pero el defectuoso alcanza a frenar al motor y no arranca. De inmediato se produce una elevación de temperatura peligrosa. En motores con poca carga puede producirse el arranque, pero el giro se cumplirá con una velocidad menor que la normal, y se escuchará un ruido

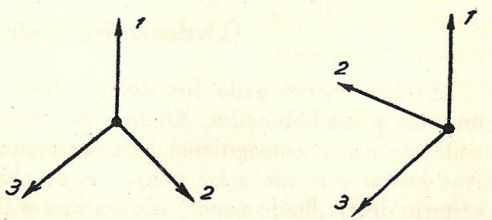

FIG. 275. — La inversión de las conexiones de una fase ocurre solamente en los bobinados trifásicos.

similar a un ronquido. El remedio, lógicamente, es revisar los puentes de fases y dar vuelta el que está equivocado. Para ello debemos revisar bien los esquemas de conexiones de bobinados trifásicos en los capítulos XVII al XXII.

Errores de tensión o de cantidad de polos

Estas equivocaciones del bobinado se cometen al hacer los puentes entre las secciones. La primera se refiere a la conexión de grupos en serie dentro de cada polo, y la segunda al número de grupos que debe formar la cantidad de polos que requiere el motor para tener la velocidad especificada.

El error de tensión se manifiesta por corriente excesiva en las tres fases del bobinado, y el error en el número de polos por el hecho de que el motor funciona bien, pero con velocidad distinta a la esperada. Amperímetros en un caso y taquímetro aplicado al eje en el segundo, son los aparatos necesarios para comprobar la irregularidad.

También debe tenerse presente que el error de tensión puede ser el haber conectado más grupos en serie de los debidos, en cuyo caso, en lugar de tener una corriente excesiva en vacío se la tendrá menor que la habitual, e inclusive puede llegar a no producirse el arranque. Sabemos que la corriente de vacío debe ser un 20 a un 25 % de la normal de plena carga. Si leemos cifras menores que esas, hay que sospechar que puede haber grupos en serie equivocados. Viceversa, si la corriente en vacío, estando girando normalmente el motor es, por ejemplo, el doble de la habitual, o sea un 50 % de la de plena carga, es seguro que se han hecho grupos en serie en menor cantidad de la debida, o más grupos en paralelo que los necesarios.

En cuanto al número de polos equivocado, no olvidemos que todo cambio de las características de un bobinado puede considerarse, en cierto modo, como un cambio de tensión, tal como lo vimos en el capítulo XXVI. En consecuencia, es fácil que al haber cambiado equivocadamente el número de polos se produzca el giro a una velocidad diferente de la esperada, pero que al mismo tiempo aparezca uno de los defectos enumerados más arriba, referentes a tensiones equivocadas.

Ordenamiento de la revisión

Se han mencionado los defectos más comunes que suelen presentar los motores y sus bobinados. Algunos de ellos son también frecuentes en los generadores, y por consiguiente la descripción puede ser extendida a esos casos. Nos hemos referido a las máquinas de alternada pero es fácil advertir que el criterio desarrollado puede, sin grandes dificultades, ser llevado a las máquinas de continua, pues hay fallas que son comunes. La mayor difusión actual de las de alterna nos han hecho darles preferencia en este tema.

Ahora procederemos a dar una suerte de ordenamiento en la tarea de revisión de un motor, para contribuir a fijar ideas y orientar hacia la más rápida localización de las fallas.

Lo primero que debe hacerse cuando se termina un bobinado es revisarlo, comparándolo con el esquema de trazado. Hay que contar las espiras de cada bobina, contar las bobinas de cada grupo, los grupos de cada serie o cada paralelo, y finalmente las secciones de cada fase. Luego, aplicando baja tensión al bobinado, se miden las corrientes de las tres fases para ver si son iguales. Preferiblemente se hace esto sin colocar el rotor. Si es un rotor el que se está revisando, se lo prueba sin colocarlo dentro del estator.

Acto seguido se revisa la aislación, en la forma cómo se ha descripto con anterioridad. Luego se termina de armar el motor y se procede a hacer los ensayos aplicando tensión. Primero se lo hace arrancar con tensión reducida mediante reóstatos o transformadores de arranque y se observan ruidos, zumbidos y vibraciones. Se comprueba la velocidad y las corrientes de las fases. Tocando con la mano (la carcasa estará conectada a tierra) se verifica el calentamiento, si es excesivo, si es regular a lo largo de la periferia, si aumenta con el tiempo de marcha, etc. Cualquier anomalía en los puntos enumerados requiere desarmar el motor y revisar según se indicó anteriormente.

ÍNDICE

Pág.

Prólogo .. 7

PARTE PRIMERA

NOCIONES DE ELECTROTECNIA

CAPÍTULO I. NOCIONES SOBRE ELECTRICIDAD .. 11

Electrización de la materia .. 12
Campo eléctrico .. 13
Potencial eléctrico .. 13
Capacidad eléctrica .. 14
Constante dieléctrica .. 16
Rigidez dieléctrica .. 16
Corriente eléctrica .. 16
Ley de Ohm .. 17
Unidades internacionales .. 18
Resistencia eléctrica .. 19
Trabajo eléctrico .. 20
Potencia eléctrica .. 21
Unidades prácticas de potencia y de trabajo .. 22
Transformación de la electricidad en calor .. 23
Variación de la resistencia con la temperatura .. 23

CAPÍTULO II. ELECTROMAGNETISMO .. 25

Magnetismo producido por la corriente eléctrica .. 26
Solenoides .. 27
Campo en el interior del bobinado .. 28
Imantación de núcleos de hierro .. 28
Histéresis magnética .. 30
Fuerzas electromagnéticas .. 31
Inducción electromagnética .. 34
Inducción mutua .. 36
Autoinducción .. 37
LA CORRIENTE ALTERNADA .. 38
Frecuencia de la corriente alternada .. 40
Valores característicos .. 40
Circuitos de corriente alternada .. 41
Ley de Ohm para corriente alternada .. 42
Potencia de la corriente alternada .. 45

Pág.
Circuitos trifásicos .. 46
Potencia de sistemas trifásicos .. 48
Representación vectorial de magnitudes alternadas .. 48
Corrientes de Foucault .. 50

Parte Segunda

FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Capítulo III. GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA .. 55

Principio de funcionamiento de generadores de corriente continua .. 56
Colector o conmutador .. 59
Escobillas .. 61
Porta-escobillas .. 62
Valor de la f. e. m. inducida .. 62
El circuito magnético .. 63
Máquinas tetrapolares .. 66
Características de funcionamiento de generadores .. 67
Máquinas con excitación independiente .. 67
Máquinas auto-excitadas .. 67
Aplicación de los diversos tipos .. 69
Reacción del inducido .. 70
Conmutación .. 72
Curvas características .. 73
Característica en vacío .. 73
Característica de carga .. 74
Regulación de la tensión .. 78
Paralelo de generadores .. 79

Capítulo IV. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA .. 81

Leyes que rigen el funcionamiento .. 82
Fuerza contra-electro-motriz .. 84
Tensión aplicada al motor .. 85
Arranque del motor .. 86
Cálculo del reóstato de arranque .. 87
Regulación de velocidad .. 89
Curvas características de motores .. 90
Comparación de las cuplas de arranque .. 92
Partes del motor .. 93

Capítulo V. GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA .. 95

Principio de funcionamiento .. 96
Forma de la f.e.m. inducida .. 97
Valor de la fuerza electro motriz inducida .. 98
Frecuencia de la f.e.m. inducida .. 101
Partes de que se compone el alternador .. 102
Características de alternadores .. 104
Reacción de la armadura o inducido .. 105
Característica de vacío o magnética .. 106
Característica de carga .. 107
Característica de regulación o de campo .. 108

Pág.
Regulación de la tensión .. 108
Puesta en paralelo de alternadores .. 109

Capítulo VI. MOTORES SINCRÓNICOS .. 113

Principio de funcionamiento .. 113
Campo giratorio .. 115
Fuerza contra-electro-motriz .. 119
Características de motores sincrónicos .. 121
Partes de que se compone el motor sincrónico .. 122

Capítulo VII. MOTORES ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS .. 123

Principio de funcionamiento .. 123
Resbalamiento .. 125
Frecuencia en el rotor .. 126
Corriente en el rotor .. 128
Métodos de arranque .. 129
Partes de que se compone un motor de inducción .. 133
Diagrama circular de Heyland .. 135
Características de los motores asincrónicos .. 137

Capítulo VIII. MOTORES ASINCRÓNICOS MONOFÁSICOS .. 139

Principio de funcionamiento .. 139
Partes componentes del motor asincrónico monofásico .. 142
Arranque de los motores monofásicos .. 144
Sistema magnético de arranque .. 145
Sistemas eléctricos de arranque .. 146
Sistemas con resistencia óhmica en la fase auxiliar .. 146
Sistemas con bobina en la fase auxiliar .. 148
Sistemas que emplean capacitor .. 149
Dispositivo interruptor centrífugo .. 152
Otros dispositivos .. 153

Capítulo IX. MOTORES UNIVERSALES Y DE REPULSIÓN .. 155

Principio de funcionamiento .. 155
Funcionamiento con distintas tensiones .. 158
Consideraciones prácticas .. 158
Motores monofásicos de repulsión .. 159
Principio de funcionamiento .. 159
Bobinados de los motores a repulsión .. 161
Motores a repulsión-inducción .. 162

Parte Tercera

BOBINADOS DE CORRIENTE CONTINUA

Capítulo X. BOBINADO DEL INDUCTOR .. 167

Número de inductores .. 167
Forma y tamaño de los inductores .. 168
Número de espiras de los inductores .. 169

Pág.

Máquinas existentes .. 169
Máquinas nuevas o modificadas .. 171
Determinación del número de Amper-vueltas .. 171
Máquinas con excitación en serie .. 175
Máquinas con excitación en paralelo o derivación .. 176
Máquinas con excitación mixta o compound .. 178
Conexiones relativas de los campos .. 178

Capítulo XI. BOBINADO DEL INDUCIDO .. 181

Devanados de inducido en tambor .. 182
Clasificación de bobinados .. 183
Pasos elementales o de bobina .. 185
Paso polar .. 187
Paso de colector .. 187
Elementos de un bobinado .. 188
Colocación de las bobinas en el rotor .. 189

Capítuo XII. BOBINADO IMBRICADO O PARALELO .. 193

Cálculo del bobinado. Pasos elementales .. 195
Pasos de ranura .. 196
Paso de colector .. 197
Posición de escobillas .. 197
Ejemplo de bobinado imbricado para máquina de dos polos .. 197
Ejemplo de bobinado imbricado para máquina de cuatro polos .. 202
Devanados con el número de delgas indivisible por el número de polos .. 207

Capítulo XIII. BOBINADO ONDULADO O SERIE .. 211

Condición del bobinado .. 212
Cálculo del bobinado .. 213
Pasos de ranura .. 213
Paso del colector .. 214
Ejemplos numéricos .. 214
Posición de escobillas .. 216
Ejemplo de bobinado ondulado para máquina de dos polos .. 216
Ejemplo de bobinado ondulado "cruzado", para máquina de cuatro polos .. 221
Ejemplo de bobinado ondulado "no cruzado" .. 224

Capítulo XIV. BOBINADOS MÚLTIPLES Y SERIE-PARALELO .. 227

Bobinados imbricados múltiples .. 228
Bobinados ondulados múltiples .. 231
Bobinados serie-paralelo .. 234
Ejemplo de un bobinado serie-paralelo .. 235
Bobinados escalonados .. 237
Bobinado escalonado imbricado .. 237
Bobinado ondulado escalonado .. 239

Capítulo XV. CONEXIONES EQUIPOTENCIALES .. 241

Conexiones equipotenciales de primera clase .. 243
Condición de posibilidad .. 244

Pág.

Conexiones equipotenciales de segunda clase .. 246
Conexiones de segunda clase en bobinados imbricados múltiples .. 247
Conexiones equipotenciales de tercera clase .. 249

Capítulo XVI. CÁLCULO DE BOBINADOS Y REBOBINAJES .. 251

Cálculo del devanado del rotor .. 252
Cantidad de cobre a emplear .. 253
Sección del alambre .. 254
Rebobinaje por cambio de características .. 256
Cambio de velocidad de régimen .. 257
Cambio de tensión de régimen .. 257

Parte Cuarta

BOBINADOS DE CORRIENTE ALTERNADA

Capítulo XVII. BOBINADO DEL ESTATOR .. 263

Factores característicos .. 263
Tipos de bobinados .. 266
Formas de ejecución .. 267
Bobinado en cadena .. 267
Bobinado en doble capa, imbricado o de bobinas iguales .. 268
Bobinados de barras .. 269
Resumen comparativo entre los diversos tipos .. 270

Capítulo XVIII. BOBINADOS TRIFÁSICOS EN CADENA .. 271

Paso del bobinado .. 272
Paso de fase .. 273
Ejemplos de bobinados en cadena .. 275
Bobinado de dos polos con cabezas en tres planos .. 275
Bobinado de cuatro polos con cabezas en dos planos .. 277
Bobinado de cuatro polos con cabezas en tres planos .. 280
Bobinado de seis polos con cabezas en dos planos .. 281
Conexiones a la caja de bornes .. 283
Devanados en cadena con ramas en paralelo .. 286

Capítulo XIX. BOBINADOS TRIFÁSICOS IMBRICADOS O DE BOBINAS IGUALES .. 289

Paso del bobinado .. 289
Paso de fase .. 290
Ejemplos de bobinados imbricados .. 291
Bobinado imbricado de dos polos .. 291
Bobinado imbricado de cuatro polos .. 294
Bobinado imbricado de paso largo para máquina de cuatro polos .. 296
Bobinado imbricado para máquina de seis polos .. 298
Tabla de bobinados .. 300

Capítulo XX. BOBINADOS TRIFÁSICOS ONDULADOS O DE BARRAS .. 303

Posibilidad de ejecución .. 304
Tipos de bobinas .. 304

Pág.

Principio de ejecución .. 305
Series de bobinas .. 305
Conexión de inversión .. 306
Reglas prácticas .. 307
Ejemplo de trazado de bobinados ondulados .. 307
Bobinado ondulado para máquina de cuatro polos .. 307
Bobinado ondulado para máquina de seis polos .. 308
Tablas de bobinados ondulados .. 309

Capítulo XXI BOBINADOS TRIFÁSICOS FRACCIONARIOS Y CON RANURAS VACÍAS .. 313

Bobinados fraccionarios con número par de bobinas por fase .. 314
Bobinados fraccionarios con número impar de bobinas por fase .. 317
Bobinados fraccionarios con ranuras vacías .. 320
Bobinados de primera clase con 3 ranuras vacías .. 320
Bobinados de segunda clase con 3 ranuras vacías .. 321
Bobinados con más de 3 ranuras vacías .. 323

Capítulo XXII. BOBINADOS DEL ROTOR .. 325

Máquinas sincrónicas - rueda polar .. 325
Motores asincrónicos o de inducción .. 327
Rotores a jaula de ardilla .. 328
Rotores bobinados .. 329
Tipos de bobinados .. 330
Bobinados imbricados .. 330
Bobinados ondulados .. 331
Bobinados con número de polos variable .. 332
Bobinados bifásicos para rotor .. 334

Capítulo XXIII. BOBINADOS DE MOTORES MONOFÁSICOS .. 337

Tipos de bobinados .. 340
Ejecución de bobinados en madeja .. 341
Colocación de la madeja en el estator .. 341
Conexiones entre las distintas secciones del bobinado .. 343
Diseño del bobinado .. 344
Ejemplos de bobinados en madeja .. 345
Bobinado monofásico de dos polos .. 346
Bobinado monofásico de cuatro polos .. 347
Ejecución de bobinados en cadena .. 349
Principio de ejecución .. 350
Ejemplos de bobinados en cadena .. 350
Bobinado monofásico de dos polos .. 351
Bobinado monofásico de cuatro polos .. 352
Bobinados progresivos .. 354
Trazado de un bobinado de dos polos .. 354

Capítulo XXIV. BOBINADOS DE MOTORES UNIVERSALES .. 359

Ejemplo de un devanado para rotor .. 360
Trazado del bobinado .. 361
Ubicación de escobillas .. 362
Características de motores universales .. 363

Pág.

Capítulo XXV. CÁLCULO DE BOBINADOS DE ALTERNA .. 365

Normas generales para el cálculo .. 366
Determinación de la potencia obtenible .. 367
Cálculo del flujo magnético .. 368
Verificación de la saturación de los dientes .. 370
Cantidad de conductores por ranura .. 371
Sección de los alambres del bobinado .. 371
Ejemplo numérico .. 372

Capítulo XXVI. CAMBIOS DE TENSIONES, POLOS Y FASES .. 375

Generalidades sobre el cambio de tensión .. 375
Cambio de la velocidad de giro .. 378
Normas generales que rigen los cambios de características .. 381
Transformación de motores trifásicos en monofásicos .. 381
Esquemas de conexiones .. 383
Transformación de motores monofásicos en trifásicos .. 385

Capítulo XXVII. EJECUCIÓN Y REPARACIÓN DE BOBINADOS .. 387

Ejecución de bobinados a mano .. 387
Ejecución de bobinados moldeados .. 388
Ejecución de bobinados de barras .. 389
Aislación de los bobinados .. 390
Conexiones equipotenciales .. 391
Fallas comunes en las máquinas eléctricas .. 391
Vibraciones y zumbidos .. 392
Revisión del bobinado .. 393
Fallas comunes de los bobinados .. 394
Contactos a masa .. 394
Cortocircuitos en el bobinado .. 395
Interrupción de circuitos en el bobinado .. 396
Inversión de bobinas o grupos .. 396
Diferente cantidad de bobinas por polo .. 397
Inversión de una fase completa .. 397
Errores de tensión o de cantidad de polos .. 398
Ordenamiento de la revisión .. 398

Este libro se terminó de imprimir en los Talleres Gráficos Dulau S.R.L.,
Rauch 1849, Buenos Aires, el 15 de julio de 1969

184

I. A. S. A. EDITORIAL HISPANO AMERICANA, S. A.

EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A. H. A. S. A.

ETEGIL
LIVROS TÉCNICOS
DE ELETRÔNICA
R. STA. IFIGÊNIA, 180
TEL.: 34-3101
CAIXA POSTAL 30.869
SÃO PAULO